Untersuchungen an Gesteinen der Zechsteinformation zur Klärung von Gebirgsdruckfragen

im Mansfelder Kupferschieferbergbau und im Kalibergbau

VON DER

TECHNISCHEN HOCHSCHULE ZU BRESLAU

ZUR

ERLANGUNG DER WÜRDE EINES DOKTOR-INGENIEURS

GENEHMIGTE

DISSERTATION

VORGELEGT VON

DIPLOM-INGENIEUR HERBERT WÖHLBIER

AUS BERGZOW

TAG DER MÜNDLICHEN PRÜFUNG: 2. FEBRUAR 1931

REFERENT: PROFESSOR DR.-ING. G. SPACKELER

KORREFERENT: A. O. PROFESSOR DR. phil. E. BEDERKE

HALLE (SAALE)

VERLAG VON WILHELM KNAPP

1931

*24565

Meinen lieben Eltern

in Dankbarkeit gewidmet.

Für die Anregung der vorliegenden Arbeit sowie die regen Unterstützungen bei der Ausführung sage ich hiermit meinem hochverehrten Lehrer, Herrn Prof. Dr.-Ing. Spackeler, meinen herzlichsten Dank.

Außerdem spreche ich an dieser Stelle meinen Dank aus für die freundliche Unterstützung, die ich dadurch erhielt, daß mir das nötige Gesteinsmaterial für die Untersuchungen zur Verfügung gestellt wurde. Ich danke daher den Herren Dr.-Ing. e. h. Ludwig, Dr.-Ing. Gillitzer, Dr.-Ing. Schnass und der Verwaltung der Grube Beendorf im Burbachkonzern.

Dem Institut für technische Mechanik an der Techn. Hochschule Breslau (Prof. Dr.-Ing. Mann) sowie dem Institut für technische Mechanik und Ärodynamik an der Universität Göttingen (Prof. Dr.-Ing. Prandtl) danke ich für die Überlassung von Apparaten.

Ferner danke ich Herrn Dr.-Ing. O. Müller und Herrn Dipl.-Ing. Dr. phil. nat. W. Marx für die Beratung und Unterstützung bei der Durchführung der Versuche.

Für die Unterstützung bei der Anfertigung der Probekörper spreche ich dem Laboratoriumswerkmeister, Herrn Seibert, meinen besten Dank aus.

R. UNIV. BIBLIOTHEEK LEIDEN

Erscheint auch in der Zeitschrift „Kali".

Untersuchungen an Gesteinen der Zechsteinformation zur Klärung von Gebirgsdruckfragen im Mansfelder Kupferschieferbergbau und im Kalibergbau.

Von Dipl.-Ing. Herbert Wöhlbier.

(Mitteilungen aus dem von Prof. Dr.-Ing. Spackeler geleiteten bergmännischen Laboratorium der Technischen Hochschule Breslau.)

Einleitung.

Der Gebirgsdruck, dessen Wirkungen im Bergbau sehr verschieden sein können, wurde in früheren Jahren als eine selbstverständliche Tatsache hingenommen, ohne daß eine wissenschaftliche Erforschung der einzelnen Gebirgsdruckfragen erfolgte. Die überragende Bedeutung, die der Gebirgsdruck für die einzelnen Bergbaugebiete hat, veranlaßte in der letzten Zeit eine ausgedehnte wissenschaftliche Beschäftigung mit diesen Fragen. Die Untersuchungen beruhten in der Hauptsache auf Beobachtungen in der Praxis und damit verbundenen theoretischen Erörterungen. Experimentelle Untersuchungen über Gebirgsdruckfragen, aus denen sich irgendwelche Analogien mit den praktischen Beobachtungen ergeben würden, sind noch neu. Es sind wohl bereits eine ganze Reihe von experimentellen Untersuchungen an Naturgesteinen bekannt, doch wurden diese meist angestellt, um zu prüfen, ob sich das betreffende Gesteinsmaterial für Bau- und Straßenbauzwecke eignet. Andererseits wurden die Versuche zum großen Teil an Einzelkristallen angestellt. Wenn das Verhalten der Einzelkristalle auch die Grundlage bildet für das Verhalten des ganzen Gesteinsverbandes, so dürfte es doch wohl zu rechtfertigen sein, wenn bei den vorliegenden Untersuchungen bewußt von Einzelkristallen abgesehen worden ist. Es sind auf diese Weise Aufschlüsse zu erwarten, die unmittelbar von Interesse für den Bergmann sind. Unmittelbare Schlußfolgerungen für die bergbaulichen Verhältnisse lassen sich daher aus den früheren Gesteinsprüfungen kaum ziehen. Für die Fragen, die den Bergmann direkt interessieren, müssen experimentelle Untersuchungen ganz besonderer Art angestellt werden. Das Material für derartige Versuche muß unmittelbar aus den einzelnen Grubenbetrieben stammen. Eine Untersuchung von Einzelkristallen hat nur beschränkte Bedeutung. Außerdem müssen die Versuchsbedingungen nach Möglichkeit den Verhältnissen unter Tage angepaßt sein.

Die erste Arbeit, die sich experimentell mit Gebirgsdruckfragen beschäftigt, ist die von Müller (20)[1]), die ebenso wie vorliegende Arbeit im bergmännischen Laboratorium der Technischen Hochschule Breslau angefertigt wurde. Die Versuchsbedingungen waren im allgemeinen bei beiden Arbeiten dieselben. Müller untersuchte Gesteine des oberschlesischen Karbongebirges und zog auf Grund seiner Untersuchungen verschiedene Folgerungen für die Gebirgsdruckfragen im Steinkohlenbergbau.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit verschiedenen Gesteinen der Zechsteinformation. Soweit es sich um Salze handelt, sind auch schon mancherlei Untersuchungen angestellt worden, die im weiteren Verlauf der Arbeit erörtert werden sollen. Über die Schichten, die im Mansfelder Kupferschieferbergbau unmittelbar wichtig sind, sind derartige experimentelle Untersuchungen nicht bekannt. Nur historischen Wert hat die Abhandlung von Plümeke (26): Versuch, die rückwirkende Festigkeit Mansfeldischer Gebirgsarten betreffend, aus dem Jahre 1837, die er selbst jedoch nicht mehr veröffentlicht hat. Plümeke untersucht hierbei die Druckfestigkeit verschiedener Gesteine mit Hilfe einer hydraulischen Dampfpresse. Er benutzte zu diesem Zwecke Würfel von 2—4″ Kantenlänge. Da bei der jedesmal angegebenen Bruchlast nicht die betreffende Würfelgröße hinzugefügt ist, läßt sich über die tatsächlich festgestellte Druckfestigkeit nichts aussagen. Dennoch ist auch für die Mansfelder Schichten eine Durchführung solcher Versuche durchaus berechtigt.

Für den Mansfelder Bergbau ist die genaue Kenntnis und Beherrschung der Auswirkungen des Gebirgsdruckes eine lebensnotwendige Frage. Ohne die Mithilfe des Gebirgsdruckes beim Abbau des Kupferschieferflözes ist ein wirtschaftlicher Bergbau hier nicht möglich. Es haben sich daher schon seit Jahrhunderten in Mansfeld Abbaumethoden entwickelt, die einen möglichst günstigen Gebirgsdruck auf den Abbaustoß bewirken. Es sei dabei an die bogenförmige Verhaulinie erinnert, die sonst im Bergbau nicht angewandt wird. Im Laufe der letzten Jahre erfolgte eine wissenschaftliche Erforschung der Gebirgsdruckfragen in Mansfeld, besonders durch Gillitzer (13 und 14). Infolge der Bedeutung der Gebirgsdruckfragen ist es daher wohlberechtigt, auch über die für den Mansfelder Bergbau wichtigen Gesteinsarten experimentelle Untersuchungen anzustellen. Für den Kalibergbau sind derartige Untersuchungen ebenfalls sehr ratsam. Die

1) Die Nummer in Klammern weist auf die gleiche Nummer im Literaturverzeichnis hin.

Art des Salzgebirges läßt nicht ohne weiteres zu, daß man Forschungsergebnisse über den Gebirgsdruck aus anderen Bergbaugebieten auf den Kalibergbau überträgt.

Die Untersuchungen erstreckten sich auf Kupferschiefer, Zechsteinkalk, Anhydrit, Gips und Älteres Steinsalz. Das Jüngere Steinsalz ist in Mansfeld nicht zugänglich. Es wurden auch Untersuchungen am Jüngeren Steinsalz vorgenommen, doch stammten diese Stücke aus Diekholzen bei Hannover. Außerdem wurde noch Hartsalz aus Diekholzen untersucht. Bei einigen Versuchsreihen erfolgten noch Untersuchungen über Sylvinit und Älteres Steinsalz aus Beendorf im Allertal.

Zu den Untersuchungen an den Salzgesteinen wurden mit einer Ausnahme keine Einzelkristalle verwendet. Alle Versuchskörper wurden aus größeren Salzstücken herausgeschnitten oder herausgebohrt.

Bei allen experimentellen Untersuchungen geologisch-bergmännischer Natur sind ganz besonders zwei Eigenschaften der Gesteine zu berücksichtigen, nämlich ihre Elastizität und ihre Plastizität. Aus der ersteren versucht man ein latentes Arbeitsvermögen des betreffenden Gesteins zu erklären, während die Plastizität dadurch zur Geltung kommt, daß durch sie z. B. Grubenbaue zuwachsen können.

Versuche über die Druckfestigkeiten.

Über Kupferschiefer, Zechsteinkalk und Gips sind keine Druckfestigkeitsversuche bekannt. Dagegen sind über die Druckfestigkeiten von Salzgesteinen einige Zahlen bekannt. Nach Rodatz (18) hat das Ältere Steinsalz (Bergemühlensalz) eine Druckfestigkeit von 475 kg/qcm, das Steinsalz der Kieseritregion 410, Carnallit 310, Kainit 435, Hartsalz bzw. Sylvinit 450, Jüngeres Steinsalz 410 kg/qcm. Es ist üblich, für Steinsalz eine mittlere Druckfestigkeit von 450 kg/qcm anzunehmen, obwohl die meisten Verfasser, die in ihren Arbeiten diese Zahl angeben, keine Quelle für diese Angaben beifügen. Anhydrit hat nach Rodatz eine Druckfestigkeit von 1100 bis 1200 kg/qcm.

Alle Versuche, die normalerweise zur Bestimmung der Druckfestigkeit angestellt werden, tragen den Verhältnissen unter Tage nicht Rechnung, da der Seitendruck auf den Körper immer nur 1 Atm. beträgt. Unter Tage herrschen andere Spannungsverhältnisse als bei den einfachen Druckversuchen. Bei einem mittleren spezifischen Gewicht der Mansfelder Gebirgsschichten von etwa 2,5 würde bei 600 m Teufe ein Druck von etwa 150 Atm herrschen. Man muß deshalb bei den entsprechenden Versuchen der vorliegenden Arbeit berücksichtigen, daß diese Werte nur als relative gelten können.

Die einfachen Druckversuche wurden zwischen den Preßplatten einer 100 t Baustoffpresse (Fig. 1) vorgenommen. Die Form der Probekörper war bei den meisten Materialsorten zylindrisch, nur bei den Salzen wurde aus Herstellungsgründen die Würfelform gewählt. Rinne (1) hat Versuche angestellt, welche Größenverhältnisse ein Körper haben soll, um eine möglichst „ideale“ Druckfestigkeit zu erzielen. Für zylindrische Körper stellte er danach fest, daß ihre Höhe am zweckmäßigsten 45 mm und ihr Durchmesser 50 mm sei.

Kupferschiefer.

Beim Kupferschiefer wurden verschiedene Versuchsreihen ausgeführt. Zunächst wurde eine Prüfung der Körper senkrecht zur Schichtung vorgenommen. Das Material zu Versuch 1 war vom Wolfschacht der Mansfeld A.-G. oberhalb der 10. Sohle entnommen, während Sorte 2 von der 8. Sohle des Wolfschachtes stammte. Man sieht aus der Tabelle, daß beide Werte gut übereinstimmen. Vom Kupferschiefer des Vitzthumschachtes der Mansfeld A.-G. wurden drei Versuchsreihen senkrecht zur Schichtung ausgeführt. Das Material stammte von der 8., der 9. und der 10.

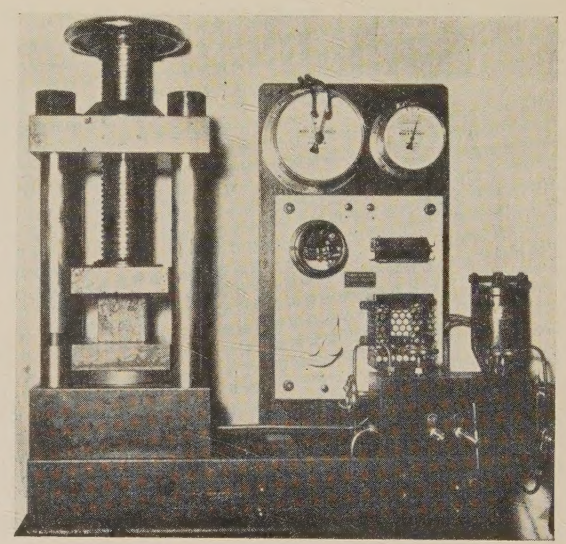

Fig. 1. 100-t-Baustoffpresse.

Sohle. Beim dritten Versuch wurde ein Wert gefunden, der sich vollkommen mit denen vom Wolfschacht deckt, während die anderen niedriger liegen.

Man sieht aus diesen Untersuchungen, daß die Verschiedenartigkeit der Festigkeitswerte z. T. recht beträchtlich sein kann. Man könnte u. a. daraus folgern, daß eine bemerkenswerte Leistungssteigerung an irgendeinem Punkte der Grube, an dem sonst kein ersichtlicher Grund für diese Steigerung vorhanden ist, vielleicht mit einer geringeren Festigkeit des betreffenden Flözteiles zu erklären ist. Um diese Ansicht zu bestätigen, wäre allerdings eine sorgfältige experimentelle Untersuchung der entsprechenden Grubenabschnitte nötig, der eine Gegenüberstellung der Leistung in diesen Grubenabschnitten folgen müßte. Über den Rahmen der vorliegenden Arbeit würden derartige Untersuchungen hinausgehen. Hier genügt der Hinweis, daß tatsächlich bedeutende Unterschiede in der Druckfestigkeit vorhanden sind.

Bei diesen Versuchen über die Druckfestigkeit senkrecht zur Schichtung erfolgte der Bruch immer

Tabelle 1. Zusammenstellung der Druckfestigkeiten.

	1.	2.	3.	4.	5.	Mittel	1.	2.	3.	4.	5.	Mittel	1.	2.	3.	4.	5.	Mittel	Gesamtmittel
Kupferschiefer ⊥ zur Schichtung: Wolfschacht, 10. u. 8. Sohle . .	1130	940	1080	860	1290	1060	1110	1200	1020	945	920	1020	—	—	—	—	—	—	1040
Kupferschiefer ⊥ zur Schichtung: Vitzthumschacht, 8., 9., 10. Sohle	870	900	905	940	945	905	775	790	795	815	845	805	1020	1030	1035	1075	1095	1050	920
Kupferschiefer ‖ zur Schichtung: Wolfschacht, 8. u. 9. Sohle, nach 1 Min. Bruch	780	870	790	820	815	820	770	775	790	820	830	800	—	—	—	—	—	—	810
Kupferschiefer ‖ zur Schichtung: Wolfschacht, 8. Sohle, nach 30 Min. Bruch	1210	1260	1270	—	—	1240	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1240
Zechsteinkalk: Wolfschacht, 9. Sohle . . .	2400	2380	1700	2010	1830	2060	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1940
Zechsteinkalk: Wolfschacht, 10. Sohle . . .	1805	1835	1800	1850	1855	1820	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
Zechsteinkalk: Vitzthumschacht, 8. Sohle . .	1000	1170	1650	1680	1685	1400	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1650
Zechsteinkalk: Vitzthumschacht, 10. Sohle . .	1600	1890	2010	2180	1750	1900	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	

sehr heftig und mit lautem Knall, wobei die einzelnen Stücke mehrere Meter weit fortflogen. Eine plastische Verformung trat vor dem Bruch nicht ein. Es bildeten sich gut ausgeprägte Druckkegel (Fig. 2).

Parallel zur Schichtung wurden auch verschiedene Versuchsreihen ausgeführt. Das Material für Versuch 1 stammte vom Wolfschacht aus der 8 Sohle und das für Versuch 2 aus der 9. Sohle. Die beiden Werte stimmen gut überein. Diese Druckfestigkeit beträgt etwa 80 % von jener bei senkrechter Beanspruchung. Der Bruch erfolgte hierbei nicht so heftig wie bei den ersten Versuchen. Druckkegel bildeten sich gar nicht, sondern die Zylinder wurden in eine Anzahl Platten zersprengt, die parallel zur Schichtung verliefen. Fig. 2 zeigt gleichfalls einen derartig gedrückten Körper, an dem auch die ursprüngliche Form der Zylinder zu erkennen ist.

Ein weiterer Druckversuch, der parallel zur Schichtung ausgeführt wurde, hatte den Zweck, festzustellen, welchen Einfluß die Belastungsdauer auf die Druckfestigkeit hat. Es wurde hierbei dasselbe Material wie bei Versuch 1 der parallel zur Schichtung gedrückten Körper verwendet. Während bei den normalen Versuchen die Last gleichmäßig gesteigert wurde, so daß der Bruch etwa nach einer Minute eintrat, wurde bei diesem letzten Versuch stufenweise Last aufgegeben, so daß die ganze Belastungszeit etwa 30 Minuten dauerte. Die drei untersuchten Körper erreichten auf diese Weise eine Druckfestigkeit von 1240 kg/qcm im Mittel. Dieser Wert liegt um 51 % über dem Durchschnitt 820 und um 45 % über dem höchsten Wert 870 kg/qcm. Die Heftigkeit und der Knall des Bruches waren in diesem Falle stärker als bei den übrigen Versuchen.

Zechsteinkalk.

Bei der offenbar richtungslosen Struktur des Zechsteinkalkes schien mir die Untersuchung nur in einer Richtung nötig. Es wurden hier vier Materialsorten geprüft. Die erste stammte aus der 9. Sohle, die zweite aus der 10. Sohle des Wolfschachtes. Die beiden Mittelwerte unterscheiden sich um 240 kg/qcm. Erheblich größer ist der Unterschied bei den Werten des Zechsteinkalkes vom Vitzthumschacht, der aus der 8. und 10. Sohle stammte. Hier beträgt der Unterschied 500 kg/qcm. Für den Zechsteinkalk gilt dasselbe wie für den Kupferschiefer, was die Verschiedenartigkeit in der Festigkeit betrifft. Ein Zechsteinkalk mit geringerer Festigkeit würde die Bohrarbeit beschleunigen. Der Streckenvortrieb würde an solchen Stellen schneller vorwärtskommen, und der Abbau würde als Folge hiervon auch bessere Fortschritte erzielen.

Beim Bruch der Zechsteinkörper bildeten sich Druckkegel, die im Gegensatz zu den Druckkegeln der übrigen Gesteinssorten sehr schmal und spitz und im Verhältnis zur ursprünglichen Zylinderhöhe sehr hoch waren (Fig. 3). Die Grundfläche der Kegel ist infolge des veränderten Bruchwinkels dieses Materials sehr klein geworden. Der Knall, mit dem der Bruch erfolgte, war außerordentlich heftig. Ob eine Veränderung der Druckfestigkeit mit wachsender Teufe

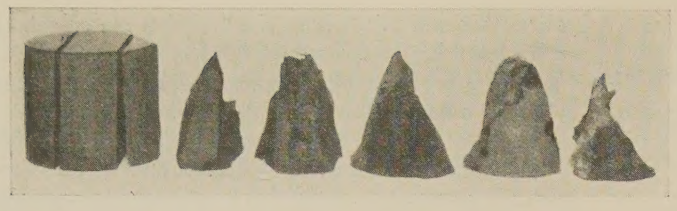

Fig. 2. Druckkegel vom Kupferschiefer.
Der Körper links wurde parallel zur Schichtung, die anderen senkrecht dazu gedrückt.

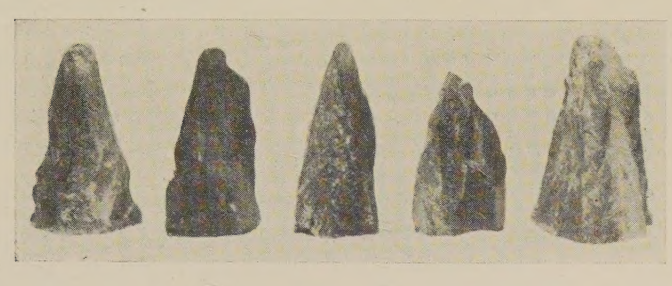

Fig. 3. Druckkegel vom Zechsteinkalk.

vorhanden ist, konnte an Hand dieser wenigen Versuche nicht festgestellt werden.

Anhydrit.

Der Anhydrit stammte aus der 6. Sohle des Wolfschachtes. Es wurden fünf Zylinder untersucht, die Druckfestigkeiten betrugen 1240, 1150, 1185, 1170 und 1205, im Mittel also 1200 kg/qcm (Fig. 4).

Gips.

Der Gips stammte vom Wolfschacht oberhalb der 7. Sohle. Auch hier war wie beim Anhydrit keinerlei Schichtung vorhanden, so daß die Untersuchung von fünf Zylindern genügte. Die Druckfestigkeiten betrugen 1010, 715, 800, 975 und 870, im Durchschnitt 870 kg/qcm. Hier erfolgte der Bruch nicht so heftig wie bei den anderen Materialsorten. Es bildeten sich hier stumpfe Druckkegel. Es handelte sich in diesem Falle um einen Gips von offensichtlich brecciöser Natur.

Älteres Steinsalz.

Über die Festigkeit verschiedener Salzsorten gibt es bereits verschiedenerlei Untersuchungen. Von den Mansfelder Salzsorten wurde hier das Ältere Steinsalz aus der 6. Sohle von rein weißem, milchigem Aussehen geprüft. Seine Druckfestigkeit betrug 430, 410, 450, 435 und 455, im Mittel 435 kg/qcm. Es wurde bereits erwähnt, daß die Salzkörper in Würfelform hergestellt wurden. Die Druckproben verliefen hier anders als bei den übrigen Versuchen, wie ja vorauszusehen war. Ein plötzliches Brechen der Würfel trat nicht ein. Rinne(1) vertrat die Ansicht, daß eine Prüfung der Druckfestigkeiten von Salzgesteinen auf diese Weise nicht möglich ist. Nachdem der Körper um etwa 2—3 mm zusammengedrückt war, lösten sich unter beständigem Knistern auf allen vier Seiten Schalen über die ganze Würfelfläche ab, die in der Mitte stärker als an den Rändern waren. Die Ablösung der Schalen vom Würfel erfolgte nur langsam. Die Bruchbelastung war gut festzustellen, da sie ja wie bei allen anderen Gesteinssorten dann erreicht war, wenn der Zeiger am Manometer zurückschlug. Dieses Zurückschlagen des Zeigers erfolgte nicht so plötzlich, wie bei den übrigen Gesteinssorten, aber doch deutlich genug, um eine genaue Ablesung zu ermöglichen. Das Ältere Steinsalz hatte eine durchschnittliche Korngröße von 0,8 mm. Die Korngröße war verhältnismäßig sehr gleichmäßig.

Jüngeres Steinsalz.

Die drei untersuchten Würfel vom Jüngeren Steinsalz hatten eine Festigkeit von 310, 320 und 330, im Mittel also 320 kg/qcm. Der Bruch erfolgte auch hier allmählich unter Ablösung großer Schalen. Das Salz veränderte ständig seine ursprünglich gelbbraune Färbung. Schließlich hatten die Würfel eine rötlichweiße Farbe. Fig. 6 zeigt einen solchen Salzwürfel, von dem sich die einzelnen Schalen abgelöst haben. Die Korngröße des Jüngeren Steinsalzes betrug im Maximum 10 mm, im Minimum etwa 1 mm, im Durchschnitt 3—6 mm.

Hartsalz.

Etwa dieselbe Festigkeit wie das Jüngere Steinsalz hatte das Hartsalz. Es ergaben sich hier die Werte 280, 300, 335 und 350, im Mittel 315 kg/qcm.

Es kann in diesem Zusammenhang noch ein Druckversuch erwähnt werden, wenn er auch nicht in unmittelbarem Zusammenhang mit den anderen Versuchen steht. Aus gemahlenem Älteren Steinsalz wurde ein zylinderförmiges Salzbrikett hergestellt, das gleichfalls gedrückt wurde. Interessant ist an diesem Versuch die Verschiebung der beiden Druckkegel gegeneinander, wie auf Fig. 7 zu ersehen ist. Die Kegel behielten völlig ihren Zusammenhang.

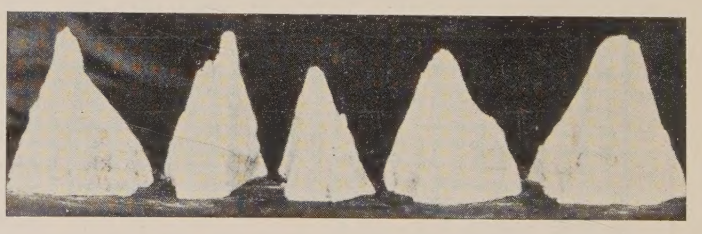

Fig. 4. Druckkegel vom Anhydrit.

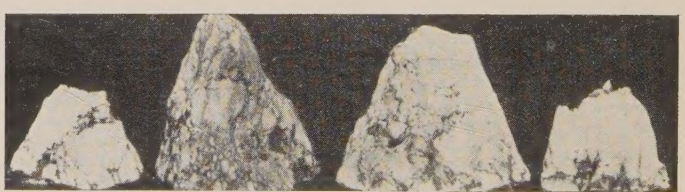

Fig. 5. Druckkegel vom Gips.

Versuche über die Kompression der Gesteine.

Es wurden Versuche mit den vorliegenden Gesteinssorten vorgenommen, um festzustellen, in welchem Maße die betreffenden Gesteine sich komprimieren lassen. Die erste Bedingung bei diesen Versuchen ist naturgemäß die, daß der Körper nach keiner Seite ausweichen kann. Die Versuche wurden daher in einer starkwandigen Stahlhülse ausgeführt, deren Durchmesser genau 40 mm und deren Höhe 100 mm betrug (Fig. 8). Die Versuchskörper wurden sorgfältig auf den Zylinderdurchmesser abgedreht. Um auch geringe Unebenheiten noch auszugleichen, erhielt jeder Körper einen Paraffinüberzug von etwa 1 mm Stärke, so daß er sich nur mit Hilfe der Presse in die Stahlform drücken ließ. Das Nähere über die Versuchsausführung findet sich in der Arbeit von Müller.

Fig. 6. Würfel von Jüngerem Steinsalz nach einem Druckversuch.

Fig. 7. Druckversuch an einem Brikett von Älterem Steinsalz.

Es wurde die Kompression bei verschiedenen Belastungsstufen gemessen, und zwar bei 200, 300, 400, 500 und 1000 kg/qcm. Die gesamte Kompression wurde in Prozent der ursprünglichen Höhe des Versuchskörpers umgerechnet. Nach Beendigung der Belastung dehnten sich die Körper mehr oder weniger stark aus. Über das Maß dieser Ausdehnung geben die Elastizitätsversuche entsprechenden Aufschluß. Es handelte sich bei dieser Ausdehnung nur um geringe Beträge, wenigstens bei der vorliegenden, kurzen Beobachtungszeit. Bei dem Jüngeren Steinsalz konnte mit genügend großer Genauigkeit auch die federnde Kompression gemessen werden, da hier die Gesamtkompression erheblich höher lag als bei den übrigen Gesteinen.

Von jedem Material wurden verschiedene Versuchsreihen ausgeführt und aus ihnen das Mittel genommen. Die Ergebnisse waren folgende:

Kupferschiefer.

kg/qcm	Gesamtkompression in Prozenten
200	0,22
300	0,28
400	0,34
500	0,40
1000	0,80

Es muß hierbei betont werden, daß bei diesen Versuchen nicht die feine Lette untersucht wurde, von der man annehmen kann, daß ihre Kompression höher sein würde. Infolge des feingeschichteten losen Zusammenhanges der feinen Lagen war es nicht möglich, die entsprechenden Probezylinder herzustellen.

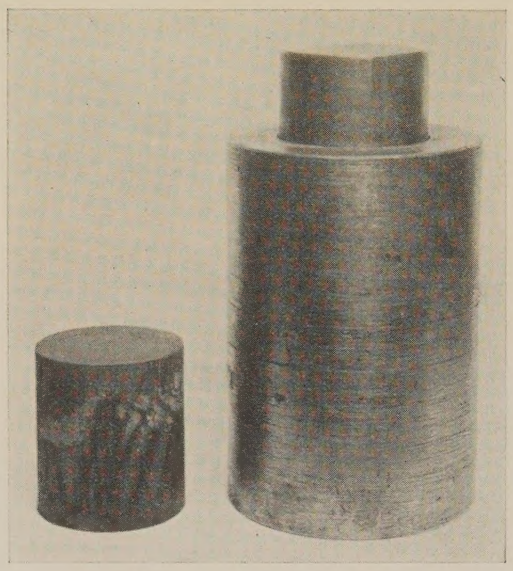

Fig. 8. Stahlform für die Kompressionsversuche, daneben ein Probezylinder von Kupferschiefer.

Zechsteinkalk.

kg/qcm	Gesamtkompression in Prozenten
200	0,04
300	0,09
400	0,16
500	0,23
1000	0,39

Anhydrit.

200	0,05
300	0,09
400	0,14
500	0,19
1000	0,35

Gips.

200	0,17
300	0,19
400	0,23
500	0,31
1000	0,42

Jüngeres Steinsalz.

200	1,38
300	2,18
400	2,8
500	3,33
1000	4,72
1200	5,12
1000	5,28
500	5,25
400	5,23
300	5,21
200	5,19

Um hier die federnde Kompression besonders gut zu erhalten, wurde der Druck bis 1200 kg/qcm gesteigert. Es ist auffallend, daß die Kompression noch andauerte, nachdem die Belastung bereits ihren Höhepunkt überschritten hatte. Es ist dies darauf zurückzuführen, daß bei den angewandten Belastungen die Elastizitätsgrenze bereits überschritten war.

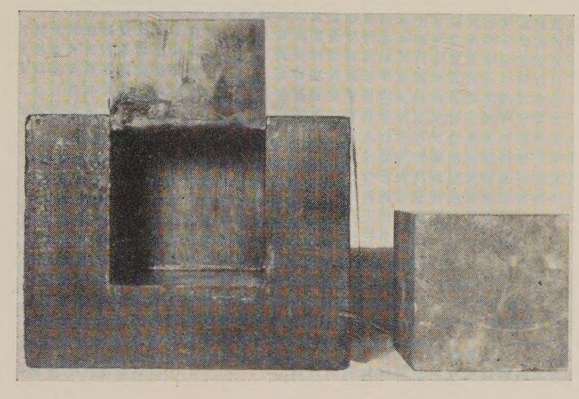

Fig. 9. Stahlform für die Ausführung der Versuche über Rißbildung im Gestein.

Versuche über Rißbildung im Gestein.

Es wurde der Versuch gemacht, einen Probekörper einer Druckbeanspruchung zu unterwerfen, die sich an die Verhältnisse in der Grube anlehnt. Zu diesem Zweck mußte der Körper so gepreßt werden, daß nur nach einer Seite hin eine Ausweichmöglichkeit bestand, entsprechend der Ausweichmöglichkeit unter Tage in eine Strecke oder einen Abbau hinein. Dazu diente eine starke Stahlform von kubischen Formen, die nach einer Seite hin offen war (Fig. 9). Die Versuchskörper wurden sorgfältig auf die Ausmaße der Stahlform abgedreht und geschliffen, so daß der Körper nur nach der offenen Seite ausweichen konnte.

Kupferschiefer.

Zunächst wurde ein Würfel so in die Form gestellt, daß der Druck parallel zur Schichtung erfolgte. Hierbei ergaben sich keine bemerkenswerten Erscheinungen. Der Würfel wurde entsprechend seiner gut ausgebildeten Schieferung in eine große Anzahl Schalen zerbrochen (Fig. 10). Die Schichtflächen verliefen parallel zur offenen Würfelfläche.

Um den wirklichen Verhältnissen Rechnung zu tragen, wurde der nächste Würfel senkrecht zur Schichtung gedrückt. Die Steigerung der Last ging bei allen diesen Versuchen nur bis zu einem gewissen Punkte, dann war keine weitere Steigerung möglich. Beim Kupferschiefer war diese Höchstbelastung bei etwa 900 kg/qcm erreicht. Es erfolgte ein kurzer Knall, der an Bergschüsse erinnerte. Gleichzeitig löste sich eine Schale über die ganze offene Würfelseite ab. Nach diesem ersten Bruch wird die Beanspruchung des Körpers fortgesetzt, wobei aber die zuerst erreichte Last nicht überschritten wird. Allmählich schieben sich nun weitere Schalen heraus, indem sich die Höhe des Würfels ständig vermindert. Die Schalen gehen meist über die ganze Würfelfläche. In der Mitte werden sie bis zu 1 cm stark, während die Ränder schwächer sind. In dem Augenblick, in dem ein Gesteinsstück über die Kante des Preßstempels hinausgekommen war, geriet es in eine entspannte

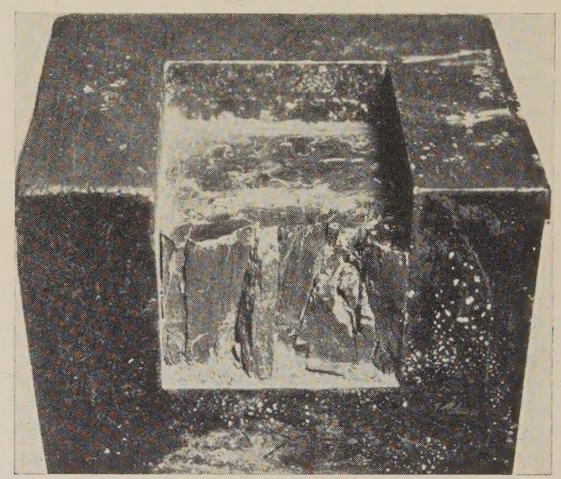

Fig. 10. Rißbildungsversuch am Kupferschiefer, parallel zur Schichtung.

Zone und ließ sich ganz leicht ablösen, während die noch gespannten Teile sehr fest saßen. Die ersten Schalen platzten parallel zur offenen Würfelfläche ab. Allmählich jedoch stellten sich die Abfallschalen spitzwinkelig zur unteren Kante der offenen Fläche.

Der Körper wurde 1 — 2 cm zusammengepreßt und dann der Stempel entfernt. Auf der Oberfläche des Würfels waren verschiedene Änderungen eingetreten. In einiger Entfernung von der offenen Fläche hatten sich Rißsysteme gebildet, die parallel zu der offenen Fläche verliefen. Sie waren deutlich mit Gesteinsmehl angefüllt, stellten also Bruchflächen dar, die vermutlich auf Druck zurückzuführen waren. Man sieht an den Aufnahmen deutlich, daß die Risse in der Mitte des Würfels breiter sind als an den Rändern. Die Reibung zwischen Stahlzylinder und Würfel war immer so groß, daß die Bewegung der Gesteinsschalen an den Randteilen langsamer

erfolgte als in der Würfelmitte. Um diese Reibung herabzumindern, wurde ein Würfel mit einer Paraffinhaut von etwa 1 — 2 mm Stärke in gleicher Weise gedrückt. Der Unterschied war erheblich. Bei einem weit geringeren Druck, bei etwa 700 kg/qcm begann diesmal das Herausschieben des Körpers. Die Bewegung war bei diesem Versuch viel schneller, die abgedrückten Schalen waren gleichmäßiger in ihrer Ausbildung. Es bestand allerdings auch hier die Ungleichheit in der Breite der Risse. In der Mitte waren sie auch jetzt noch breiter als am Rande, wenn der Unterschied auch nicht so stark ausgeprägt war. Ein Vergleich mit diesen Versuchen könnte in der Wirklichkeit vielleicht dann angestellt werden, wenn entsprechende Schichten das unmittelbare Hangende und Liegende eines Flözes bilden.

Während des Herausschiebens der Würfelschalen wandert der Preßstempel gleichzeitig mit nach der offenen Seite, da die Reibung zwischen Stempel und Probekörper groß genug war, um den Stempel mitzunehmen. Ein Widerstand stellte sich dem Stempel an der offenen Seite nicht entgegen. Auf Fig. 11

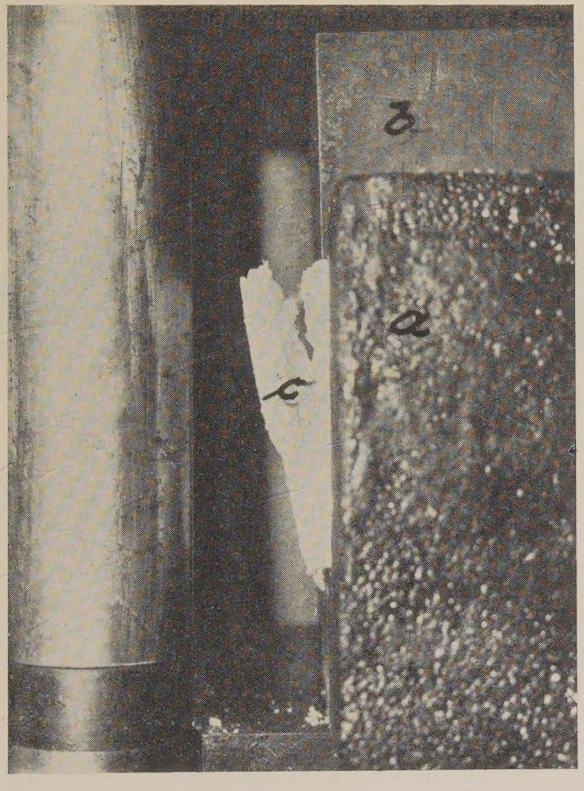

Fig. 11. Versuch über Rißbildung am Jüngeren Steinsalz. *a* Stahlform; *b* Preßstempel; *c* Herausgeschobene Salzschale.

kann man sehen, wie sich der Stempel bereits etwas herausgeschoben hat. Man sieht auch an der Aufnahme, daß die vordere Seite des Stempels etwas nach abwärts geneigt ist.

An der Rückseite des Würfels bildet sich eine Gleitfläche an einem stehenbleibenden Gesteinsstück entlang. Wenn man den Verlauf der Gleitflächen verfolgt, sieht man, daß sich im Würfel ein Keil bildet. Zum besseren Verständnis dient untenstehende Skizze (Fig. 12). An der hinteren Würfelseite in Fig. 13 sieht man den oberen Keil eines solchen

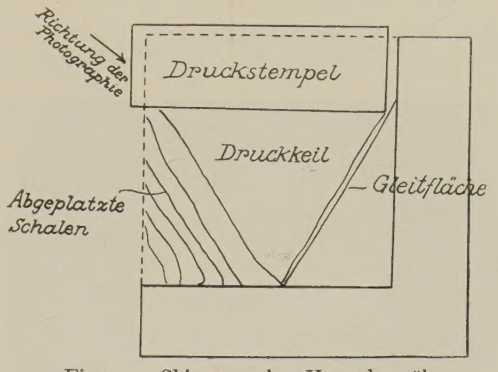

Fig. 12. Skizze zu den Versuchen über Rißbildung.

stehenbleibenden Gesteinsstückes bei einem Würfel aus Jüngerem Steinsalz. Für die Seitwärtsbewegung des Stempels findet man in der Grube eine Reihe analoger Beispiele. Es kann sich z. B. das Hangende nach offenen Grubenräumen wie Strecken oder Abbauen zugleich mit den Stößen verschieben.

Jüngeres Steinsalz.

Mit Jüngerem Steinsalz wurden in gleicher Weise Versuche mit und ohne Paraffinüberzug ausgeführt. Bei den Würfeln ohne Paraffinüberzug erfolgte die Seitwärtsbewegung der Schalen bei 450 kg/qcm,

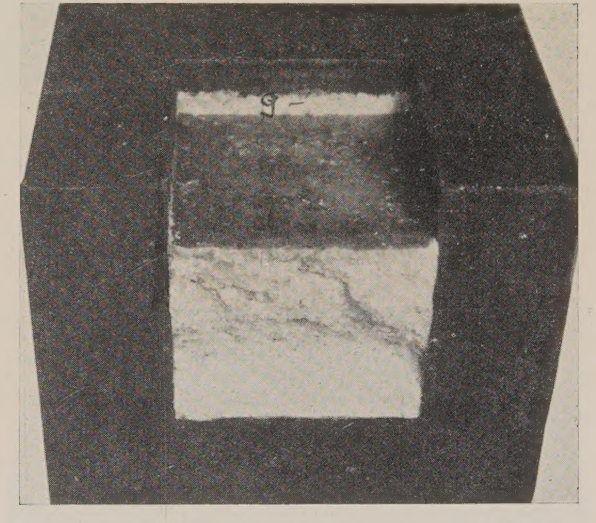

Fig. 13. Rißbildung im Jüngeren Steinsalz. *g* = Gleitfläche.

während sie bei den Würfeln mit Paraffinüberzug schon bei 300 kg/qcm begann. Die Rißausbildung war hier gleichmäßiger infolge der geringeren inneren Reibung des Materials (Fig. 14). Die Zusammendrückung des Würfels erfolgte auch hier unter beständigem Knistern wie bei den einfachen Druckversuchen. Die Farbe änderte sich gleichfalls beständig und nahm schließlich ein weißliches Aussehen an. Fig. 11 zeigt das Herausschieben einer

Salzschale, die noch etwas im Zusammenhang mit dem Würfel steht.

Älteres Steinsalz und Sylvinit.

Von dem Älteren Steinsalz und Sylvinit wurden auch Versuche mit und ohne Paraffinüberzug angestellt, die gegenüber den Versuchen mit Jüngerem Steinsalz keine Abweichungen ergaben. Fig. 15 zeigt eine starke Ausbildung der Risse. Auf der Stahlform liegt ein Stück einer abgeplatzten Schale, an welchem die Stärke dieser Ablösungsschalen zu ersehen ist.

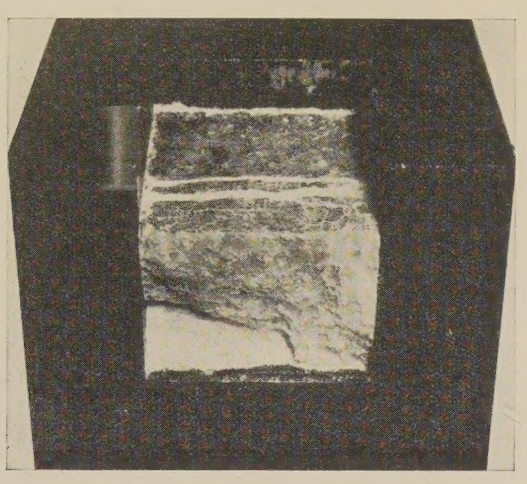

Fig. 14. Rißbildung im Jüngeren Steinsalz.

Versuche über die Verformbarkeit der Gesteine nach der Methode von Kick.

Bei Versuchen über die plastische Umformung von Gesteinen benutzte Kick (3) eine Methode, die auch in der vorliegenden Arbeit angewandt wurde. Als Aufnahmehülse für die Versuchskörper wählte Kick ein kurzes Stück starkwandiges Kupferrohr, das auf einen Weißblechboden aufgelötet wurde. Der Versuchskörper wurde dann mit Schellack, Schwefel oder Alaun umgossen, von denen der letztere die besten Ergebnisse brachte. Die Hülse wurde dann zwischen den Platten einer Presse gedrückt. Kick erzielte gute plastische Umformung u. a. von Steinsalz.

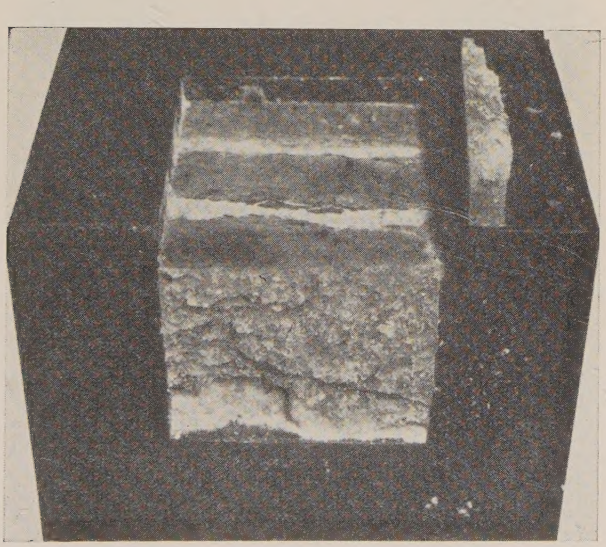

Fig. 15. Rißbildung im Älteren Steinsalz.

Rinne (4 u. 7) setzte die Untersuchungen nach dieser Methode fort. Er wählte als Füllmaterial Alaun. U. a. verformte er auch Steinsalz und Sylvin bei Drücken von 2000—3000 kg/qcm. Die Versuchskörper für meine eigenen Versuche, die nach der Kickschen Methode ausgeführt wurden, erhielten zylindrische Form. Ihre Höhe betrug etwa 25 mm und ihr Durchmesser 23 mm. Die Höhe der Kupferhülse betrug etwa 40 mm, und ihr innerer Durchmesser 32 mm. Fig. 16 zeigt die Kupferhülse vor und nach dem Versuch. Dazwischen stehen zwei Probezylinder aus Jüngerem Steinsalz, von denen der eine seine ursprüngliche Form, der andere die Form nach der Pressung hat. Mit Alaun als Füllmaterial konnten nur Kupferschiefer, Zechsteinkalk, Anhydrit und Gips geprüft werden. Nach dem Versuch wurde der Alaun durch heißes Wasser herausgelöst. Aus diesem Grunde kam eine Prüfung der Salzgesteine mit Alaun nicht in Frage. Um einen möglichst hohen allseitigen Druck auf die Probekörper zu erzielen, wurde als Einbettungsmaterial noch Zinn gewählt. Bei den Salzgesteinen wurde Paraffin und Schwefel als Einbettungsmaterial genommen. Hier genügte in beiden Fällen der übertragene Druck, um eine gute plastische Umformung zu erzielen. Die Kupferhülse allein wurde bei einem Druck von 6800 kg und die Hülse mit Füllmaterial ohne Probekörper bei 830 kg/qcm gestaucht.

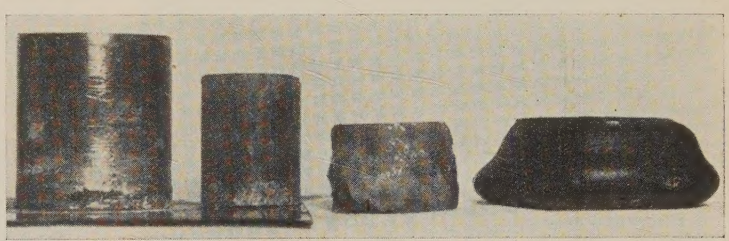

Fig. 16. Kupferhülsen für die Kickschen Versuche; links vor dem Versuch, rechts nach dem Versuch. Dazwischen zwei Probezylinder von Jüngerem Steinsalz vor und nach dem Versuch.

In der Tabelle 2 sind die einzelnen Formveränderungen der Probekörper angegeben.

Die Tabelle könnte leicht den Anschein erwecken, als ob es sich bei allen Materialsorten um plastische Umformungen handelt. Daher muß betont werden, daß derartige plastische Umformungen nur bei den Salzen in Frage kommen. Bei den anderen Gesteinssorten war die Verfestigung jedoch so stark, daß die Körper in jedem Falle einen festen Zusammenhang hatten, so daß sie, wie feste Körper, mit der Schubleere gemessen werden konnten.

Kupferschiefer.

Bei der Untersuchung mit Alaun als Einbettungsmaterial wurde der Körper gestaucht. Nach Ent-

Tabelle 2. Tabelle der Verformungen bei den Kickschen Versuchen.

		Höhe in Millimeter vor dem Versuch	Höhe in Millimeter nach dem Versuch	∅ vor dem Versuch	∅ nach dem Versuch oben	∅ nach dem Versuch Mitte	∅ nach dem Versuch unten	Einbettungsmaterial
Kupferschiefer	1.	24,7	22,7	25 0	25,7	26,3	25,6	Alaun
	2	24,8	22,9	25,0	25,2	25,8	25,6	Zinn
	3.	24,9	22,3	25,0	24,8	27,8	26,4	Zinn
Zechsteinkalk	1.	27,9	25,9	23,2	23,7	23,9	24,4	Alaun
	2.	27,5	25,8	23,2	24,4	24,5	26,0	Zinn
	3.	26,6	25,2	23,2	24,2	23,2	24,7	Zinn
Anhydrit	1.	26,7	24,8	23,7	24,0	24,9	25,0	Zinn
	2.	24,0	20,2	23,7	26,1	27,8	27,4	Zinn
Gips	1.	25,8	23,4	22,8	23,3	25,1	27,5	Zinn
	2	30,4	27,5	25,7	27,5	28,0	29,8	Zinn
Ält. Steinsalz (Mansfeld)	1.	29,3	27,4	23,0	24,1	24,7	25,1	Paraffin
	2.	26,3	21,7	24,1	27,3	27,2	27,4	Paraffin
	3.	23,5	17,1	23,6	26,8	28,6	30,4	Schwefel
Ält. Steinsalz (Beendorf)	1.	28,3	21,5	22,0	25,0	26,8	25,0	Paraffin
	2.	27,9	24,8	22,0	22,7	23,8	23,3	Paraffin
	3	25,3	22,8	23,0	25,2	25,9	25,2	Schwefel
Jüng. Steinsalz	1.	26,3	24,4	24,0	26,1	25,9	26,3	Paraffin
	2.	24,4	19,3	24,0	27,3	27,1	27,5	Paraffin
	3.	25,1	18,8	24,0	26,7	29.0	31,3	Schwefel

fernung des Alauns war der Zusammenhalt der einzelnen Stücke verhältnismäßig gering. Man konnte sie ohne Mühe voneinander trennen. Beim Versuch mit Zinn trat eine ähnliche Stauchung des Probezylinders ein, doch waren diesmal die einzelnen Stücke nur schwer voneinander zu trennen.

Es war infolge des wesentlich höheren Druckes eine Verfestigung der Bruchstücke erfolgt. Wie Fig. 17

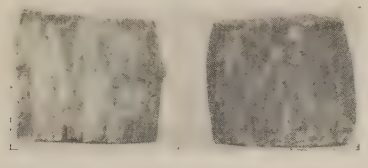

Fig. 17. Kupferschiefer.
Der linke Körper wurde in Alaun, der rechte in Zinn gestaucht.

zeigt, haben die Zylinder eine tonnenförmige Gestalt angenommen. Auf diese Weise wird fast der Eindruck einer plastischen oder bruchfreien Umformung hervorgerufen. Welcher Druck auf den Körper ausgeübt wird, läßt sich nicht genau angeben, da der gesamte Druck sich auf Probezylinder, Einbettungsmaterial und Kupferhülse verteilt. Es kann jedoch soviel gesagt werden, daß die Belastung für den Versuchskörper allein über 1000 kg/qcm betrug. Es gibt unter Tage genug Beispiele, in denen das Gestein erst zerbrochen und dann durch hohen Druck wieder verfestigt ist. Auf diese Weise können zerbrochene Gebirgsteile in verschiedene Formen übergeführt werden, und nach ihrer Verfestigung machen sie vielfach den Eindruck eines festen Gebirges, das irgendwie plastisch umgeformt erscheint. Meistens werden solche Umformungen vom Bergmann und Geologen als bruchfrei bezeichnet, sind es in Wirklichkeit aber gar nicht.

Zechsteinkalk.

Auch bei dem spröden und harten Zechsteinkalk trat eine nachträgliche Verfestigung ein. Der zum Stauchen nötige Druck war bei diesem Material naturgemäß höher. Der Versuch mit Alaun zeigte auch hier einen zu geringen Seitendruck. Der Zusammenhalt der einzelnen Teile war wohl noch stark genug, daß man den Körper frei hinstellen konnte, ohne

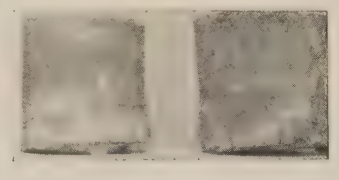

Fig. 18. Zechsteinkalk in Zinn gestaucht.

daß er zerfiel, aber bei geringem Druck erfolgte eine leichte Trennung. In zweiter Linie wurden dann wieder Versuche mit Zinn als Einbettungsmaterial ausgeführt. Hier war die nachträgliche Verfestigung wieder ziemlich stark. Die einzelnen Teile ließen sich nicht mit der Hand voneinander trennen (Fig. 18).

Anhydrit.

Die Versuche, die mit Anhydrit angestellt wurden, zeigten große Ähnlichkeit mit denen vom Zechsteinkalk. Der Gegendruck durch Alaun als Einbettungsmaterial war auch hier wesentlich geringer als der durch Zinn (Fig. 19).

Gips.

Wesentlich anders war das Versuchsergebnis beim Gips. Hier erfolgte eine deutlich sichtbare Umformung. Bruchflächen waren nicht erkennbar. Zum Teil nahmen die Körper eine tonnenähnliche Form an, zum Teil

wurden sie nach unten zu gestaucht (Fig. 20). Die Stirnflächen der Körper waren nach den Versuchen eben. Eine Zertrümmerung in größere Gesteinsstücke

Fig. 19. Anhydrit in Zinn gestaucht.

ließ sich nicht feststellen. Die Körper waren nach dem Versuch fest.

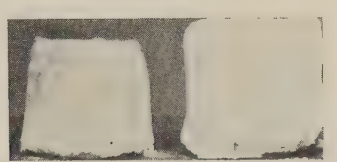

Fig. 20. Gipskörper in Zinn gestaucht.

Älteres Steinsalz.

Von Älterem Steinsalz wurden zwei Sorten untersucht. Die eine stammte von Beendorf (Burbach-Konzern) aus einem klaren, durchsichtigen Einzelkristall, die andere Sorte war ein undurchsichtiges, weißes Salz aus Mansfeld. Bei den Salzkörpern wurde als Einbettungsmaterial hauptsächlich Paraffin, bei einigen Versuchsreihen aber auch Schwefel gewählt. Ein Probekörper des durchsichtigen Älteren Steinsalzes erhielt beim Versuch eine tonnenförmige Gestalt, die aus der Fig. 21 deutlich zu ersehen ist. Irgendeine

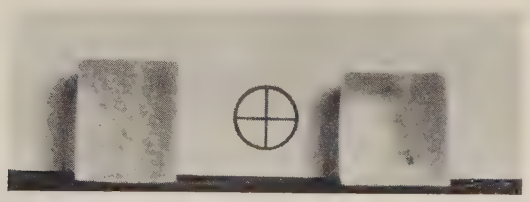

Fig. 21. Ansicht eines ungepreßten und gepreßten Steinsalzzylinders.

Spaltenbildung konnte nicht festgestellt werden. Die Durchsichtigkeit des Salzes wurde nicht im geringsten beeinträchtigt. Die Abbildung zeigt, daß ein Blatt Papier mit einem Kreis darauf durch den gedrückten Körper hindurch fast besser zu sehen war als durch den ungedrückten. Die Form der Körper war nach dem Versuch nicht immer gleichmäßig. Dies ist dadurch zu erklären, daß die Körper nicht befestigt werden konnten und sich infolgedessen leicht durch die Druckwirkung in der Hülse verschieben ließen. Die Festigkeit der Körper war nach dem Versuch ebenso groß wie vorher. Die Versuche mit Schwefel zeigten keine Abweichungen gegenüber denen mit Paraffin.

Jüngeres Steinsalz und Sylvinit.

Beim Jüngeren Steinsalz wurden ähnliche Ergebnisse erzielt wie beim Älteren. Die Körper ließen sich sehr stark deformieren, ohne daß ihr Zusammenhang irgendwie gestört erschien. Der Zeitpunkt für den Abbruch des Versuches war meist dann gegeben, wenn die Kupferhülse zu zerreißen anfing. Es ist jedoch anzunehmen, daß die Salzkörper noch eine weitere Formänderung ausgehalten hätten, ohne zu zerbrechen.

Es wurde bereits früher gesagt, daß sich bei dieser Methode nicht der Druck angeben läßt, der auf den Körper ausgeübt wird. Trotzdem kann man doch soviel sagen, daß die hier angewandten Drücke von etwa 1000 kg/qcm völlig ausgereicht haben, um eine plastische Umformung der Salzgesteine herbeizuführen.

Versuche nach der Methode von v. Kármán.

Bei den Versuchen über die Verformbarkeit der Gesteine benutzte Kármán eine Presse, deren Grund-

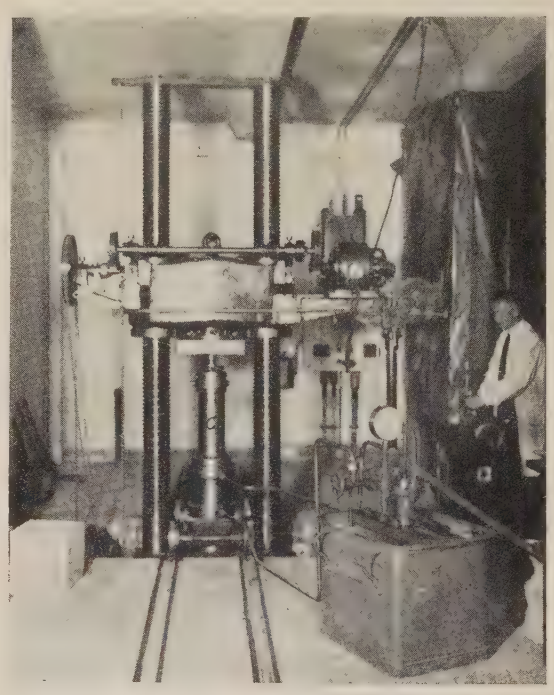

Fig. 22. Druckapparat von Kármán.
a = 500-t-Baustoffpresse für den achsialen Druck,
b = Handpumpe für den Manteldruck,
c = Kármánscher Druckapparat.

gedanke darin besteht, daß sich der Manteldruck völlig getrennt vom achsialen Druck ausüben und genau bestimmen läßt. Während Kármán (5) bei diesen Versuchen mit dieser Apparatur darauf ausging, eine plastische Umformung der Gesteine zu erzielen, wurde bei den vorliegenden Untersuchungen mit dieser Apparatur, die vom Institut für angewandte Mechanik und Aerodynamik der Universität Göttingen freundlicherweise zur Verfügung gestellt worden war, ein anderes Ziel verfolgt. Es sollte festgestellt werden, in welchem Maße die Druckfestigkeit der einzelnen Gesteinssorten wächst, wenn ein wachsender Mantel-

druck auf den Körper ausgeübt wird. Der Manteldruck wurde stufenweise gesteigert. Die Druckfestigkeit wurde bei 125, 250, 375 und 500 kg/qcm Manteldruck festgestellt.

Auf Fig. 22 wird die Presse von Kármán gezeigt, die unter einer 500 t Baustoffpresse steht. Von letzterer wird der achsiale Druck ausgeübt, während für den Manteldruck die Handpumpe im Vordergrunde der Figur vorhanden ist. Über die Versuchsausführung im einzelnen sei auf die Arbeit von Kármán (5) verwiesen. Die Probekörper des Jüngeren Steinsalzes wurden vor ihrem Bruch auch plastisch umgeformt, wie vorauszusehen war (Fig. 23).

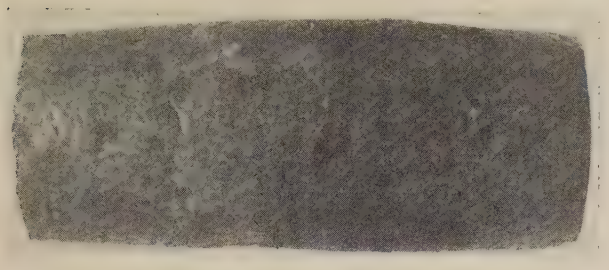

Fig. 23. Probezylinder von Jüngerem Steinsalz nach einem Versuch in der Kármán-Presse.

Irgendwelche Gleitlinien, wie sie Kármán beim Marmor und Sandstein deutlich ausgeprägt erhielt, waren infolge der grobkörnigen Struktur des Salzes nicht zu erkennen. Die achsiale Belastung der Körper wurde solange fortgesetzt, bis der Körper zerbrach. In geringerem Maße wurden auch die Gipskörper umgeformt.

Die Kupferschieferkörper wurden nicht umgeformt. Sie wurden in eine Anzahl kleinerer Stücke zerbrochen. Nach dem Bruch trat eine Verschiebung der einzelnen Teile gegeneinander und unter dem Manteldruck eine nachträgliche Verfestigung ein. Die Körper wurden etwas aufgewölbt, so daß der Eindruck einer geringen plastischen Umformung hervorgerufen wurde. Die Form des Körpers erinnert an die Erscheinungen bei den Klickschen Versuchen. Bei diesen Versuchen jedoch war der Zusammenhalt der verfestigten Bruchteile höher als bei den Versuchen mit der Kármánpresse. Allerdings ist ein ausreichender Vergleich zwischen beiden Verfestigungen nicht möglich. Beim Bruch der Körper, der immer sehr plötzlich erfolgte, zerriß die Messingblechhülse, in welche die Körper eingeschlossen wurden. Dadurch wurde der Preßflüssigkeit die Möglichkeit gegeben, unter hohem Druck in die Körper einzudringen und die einzelnen Gesteinsstücke, die durch den Manteldruck wieder untereinander verfestigt waren, auseinanderzusprengen. Jedenfalls erfolgte eine plastische Umformung des Kupferschiefers in keinem Falle. Bei den anderen Materialsorten erfolgte nur Bruch. Irgendwelche Anzeichen einer auch nur scheinbaren Umformung waren nicht festzustellen.

Auf Fig. 24 sieht man an den Kurven als Hauptergebnis dieser Versuche, in welch hohem Maße die Druckfestigkeit mit der Erhöhung des Manteldruckes wächst. Beim Jüngeren Steinsalz und Kupferschiefer steigt die Druckfestigkeit bei einem Manteldruck von 500 kg/qcm auf das $2^1/_2$fache, beim Gips, Anhydrit und Zechsteinkalk sogar auf etwa das $3^1/_2$fache der normalen Festigkeit. Man kann annehmen, daß auch die Biegungsfestigkeit bei erhöhtem Manteldruck entsprechend wachsen wird.

Elastizitätsversuche.

Zur Ausführung der Elastizitätsversuche wurden Prismen mit den Kantenlängen 9·9·18 cm aus den einzelnen Gesteinssorten hergestellt.

Die Stirnflächen wurden sehr genau planparallel geschliffen, da gerade bei diesen Versuchen schon geringe Unebenheiten die Ergebnisse erheblich beeinträchtigt hätten. Auch eine genaue zentrische Einstellung in die Presse war hier erforderlich. Die Längenänderungen wurden mit Hilfe der Martensschen Spiegelgeräte (6) gemessen. Die Befestigung am Probekörper geht aus der Fig. 25 hervor. Bei einer Belastung wird der Körper zusammengedrückt. Dadurch erhält die Schneide und damit der Spiegel eine Drehbewegung, die mit Hilfe eines Fernrohres und einer Skala gemessen wird. Bei Entlastung dehnt sich der Körper wieder aus, und der Spiegel erhält somit eine entgegengesetzte Drehrichtung. Die Ablesung erfolgte auf 1/10000 mm genau. Um eine ungleichartige Beschaffenheit der Probekörper möglichst auszugleichen, wird an zwei gegenüberliegenden Prismenflächen ein Spiegel angebracht und dadurch das Mittel gewonnen. Die Belastung erfolgt stufenweise und nur bis zu einer gewissen Höchstgrenze, die etwa bei der halben Bruchbelastung lag. Bei höherer Belastung hätte die Gefahr eines plötzlichen Abbrechens von Gesteinsschalen bestanden, und dadurch wären die Spiegelapparate gefährdet gewesen. Um ein gutes Anliegen der Preßplatten an den Stirnflächen des Probekörpers zu erzielen, wurde der Körper zunächst mit 5 kg/qcm belastet. Desgleichen wurde als Endpunkt der Entlastung auch 5 kg/qcm gewählt. Man muß also bei allen entsprechenden Kurven berücksichtigen, daß das Verhalten der Körper bei einer Belastung von 0—5 kg/qcm nicht geprüft wurde. Man sieht auch aus der Tabelle,

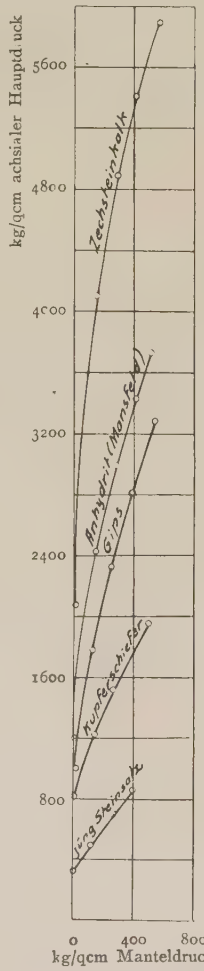

Fig. 24. Druckfestigkeiten der untersuchten Gesteine in Abhängigkeit vom Seitendruck.

daß die E.-Werte bei den erreichten Belastungen ziemlich beständig werden, so daß eine weitere Belastungssteigerung keine wesentlichen Abweichungen

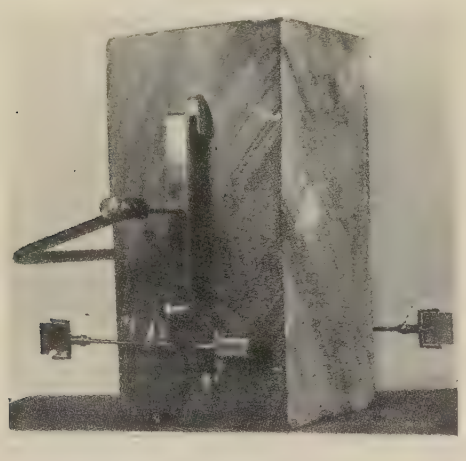

Fig. 25. Befestigung der Spiegelgeräte an einem Gesteinsprisma.

ergeben hätte. Die bei diesen Versuchen erzielten Werte können nur als relative gelten, da der Druck auf die Prismenflächen nur 1 Atm. betrug.

Die Längenänderungen wurden in Abhängigkeit von der Belastung als Kurven aufgetragen, wobei auf der Ordinatenachse die Belastung in kg/qcm und auf der Abszissenachse die Längenänderung in 1/1000 mm aufgetragen wurde.

Kupferschiefer.

Die Elastizität beim Kupferschiefer wurde nur parallel zur Schichtung festgestellt. Es gelang nicht, Prismen anzufertigen, bei denen die Längsseiten senkrecht zur Schichtung standen. Man muß also bei diesen Versuchen berücksichtigen, daß die Elastizität parallel zur Schichtung größer ist als diejenige senk-

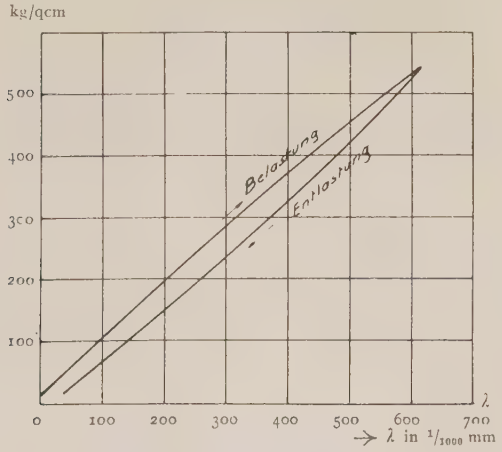

Fig. 26. Elastizitätsversuch mit Kupferschiefer bei einer Anfangs- und Endbelastung von 10 kg/qcm.

recht dazu. Diese Tatsache ist von verschiedenen Forschern nachgewiesen worden.

Die Be- und Entlastungskurven auf Fig. 26 haben einen ziemlich gleichförmigen Verlauf. In der Größe der Fläche zwischen Be- und Entlastungskurve hat man ein Maß für die Elastizität des Körpers. Je kleiner die Fläche ist, um so elastischer ist der Körper, da er ja das größte Bestreben hat, seine ursprüngliche Form wieder einzunehmen. Neben der Fläche ist auch die Höhe des ausgeübten Druckes maßgebend. Um die Fläche zwischen Be- und Entlastungskurve von verschiedenen Materialien unmittelbar vergleichen zu können, müßte man bei der Prüfung beider Gesteinsarten den gleichen Druck ausüben. Wenn Be- und Entlastungskurven zusammenfallen würden, dann wäre der Körper vollkommen elastisch. Die bleibende Längsänderung beim Kupferschiefer beträgt bei Nullast 30/1000 mm. Ein zweiter Versuch brachte dieselben Ergebnisse.

Zechsteinkalk.

Die Kurven des Zechsteinkalkes auf Fig. 27 weisen eine wesentlich geringere Gesamtlängenänderung als die des Kupferschiefers auf. Obwohl hier ein höherer Druck angewendet wurde, sieht man

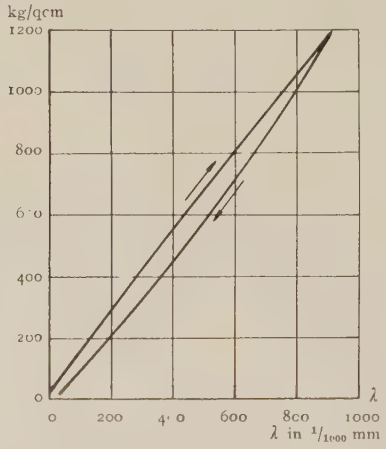

Fig. 27. Zechsteinkalk.

doch deutlich, daß die Fläche zwischen Be- und Entlastungskurve hier beim Zechsteinkalk geringer ist. Infolgedessen ist seine Elastizität höher als die vom Kupferschiefer. Die bleibende Längenänderung beträgt in diesem Falle 25/1000 mm. Infolge der hohen Druckfestigkeit konnte hier die Belastung bis zu 1200 kg/qcm gesteigert werden. Aus der Kurve geht hervor, daß der Zechsteinkalk eine verhältnismäßig hohe Elastizität hat. Sie ist ungefähr ebenso hoch wie die vom Anhydrit. Bei einem zweiten Versuch wurden dieselben Ergebnisse wie beim ersten erzielt.

Anhydrit.

Die Kurven des Anhydrits auf Fig. 28 zeigen einen ähnlichen Verlauf, wie die vom Zechsteinkalk. Beim zweiten Versuch fällt auf, daß die beiden Kurvenäste einen gleichmäßigeren Verlauf haben als die vom ersten Versuch. Dies hat seinen Grund in einer Verschiedenart der Belastung. Beim ersten Versuch wurde die Last gleichmäßig in bestimmten Druckstufen gesteigert, die Entlastung erfolgte ebenso. Beim zweiten Versuch erfolgte zwischen je zwei Druckstufen immer eine völlige Entlastung. Vielleicht ist

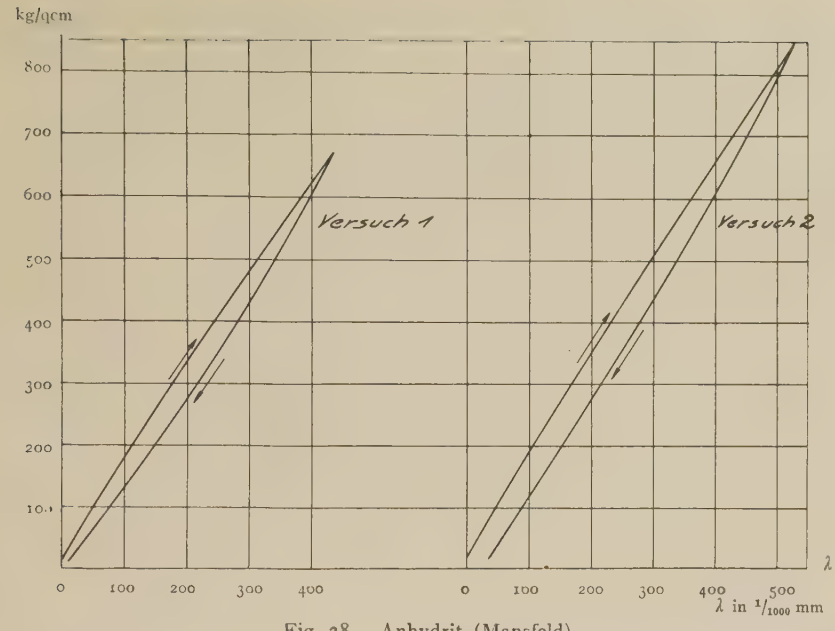

Fig. 28. Anhydrit (Mansfeld).

diese Gleichmäßigkeit bei der zweiten Belastungsart darauf zurückzuführen, daß noch geringe Unebenheiten an den Stirnflächen der Körper durch diese Belastungsart ausgeglichen werden.

Jüngeres Steinsalz.

Einen vollkommen anderen Verlauf als die bisher geschilderten haben die Kurven der untersuchten Salzgesteine. Am besten tritt diese Verschiedenartigkeit gegenüber den bisherigen Körpern beim Jüngeren Steinsalz hervor (Fig. 29). Die Belastungskurve steigt nicht gleichmäßig an, wie es beim Kupferschiefer, Zechsteinkalk und Anhydrit der Fall war. Hier beim Jüngeren Steinsalz erfolgte eine ungleichmäßige Zunahme der Längenänderung. Nach Überschreitung einer Belastung von etwa 100 kg/qcm nahm die Formänderung erheblich schneller zu, was sich in einem flacheren Verlauf der Kurve äußert. Bei den übrigen Kurven stoßen Be- und Entlastungskurve immer in einer scharfen Spitze zusammen. Hier beim Jüngeren Steinsalz gehen die Kurven allmählich ineinander über. Die Entlastungskurve beim Jüngeren Steinsalz fällt fast senkrecht ab. Die bleibende Längenänderung beträgt hier bei Nullast 3300/1000 = 3,3 mm. Der angewandte Druck war verhältnismäßig gering. Er betrug nur 200 kg/qcm. Ein zweiter Versuch brachte dieselben Ergebnisse. Die Kurve zeigt deutlich, daß bei dem angewandten Druck die Elastizitätsgrenze des Materials erheblich überschritten war. Sie liegt bei etwa 90 Atm. während 200 Atm. erreicht wurden. Um festzustellen, wie der Verlauf der Kurve bei geringeren Belastungen sein würde, wurden zwei weitere Versuche mit Jüngerem Steinsalz angestellt. Bei dem einen Versuch wurde die Belastung bis 40 kg/qcm, beim anderen nur bis 20 kg/qcm gesteigert (Fig. 30). Wie nach dem Verlauf der ursprünglichen Kurve anzunehmen war, wurde bei dieser Belastung von 40 bzw. 20 kg/qcm die Elastizitätsgrenze nicht überschritten. Der Körper kehrte in beiden Fällen schneller in seine ursprüngliche Form zurück, als der mit 200 kg/qcm belastete. Kennzeichnend ist jedoch auch hier, daß das Bestreben, seine alte Form wieder einzunehmen, in beiden Fällen weit geringer ist, als beim Zechsteinkalk, Anhydrit und Kupferschiefer.

Das starke Umbiegen der Entlastungskurve im unteren Teile ist darauf zurückzuführen, daß der Körper noch mehrere Tage bei der geringen Anfangsbelastung unter der Presse verblieb; die dabei noch eintretenden Ausdehnungen wurden mit aufgetragen.

Älteres Steinsalz.

Vom Mansfelder Älteren Steinsalz wurden gleichfalls zwei Prismen untersucht; die dazu gehörigen Kurven (Fig. 31) zeigen, daß die Elastizität wohl höher ist als die des untersuchten Jüngeren Steinsalzes, aber auch hier bleibt sie hinter derjenigen der übrigen untersuchten Gesteine zurück. Ein Vergleich mit der Kurve des Jüngeren Steinsalzes ist hier leicht möglich, da bei beiden Salzsorten die gleiche Druckstufe von 200 kg/qcm erreicht wurde. Die Belastungskurven verlaufen hier viel gleichmäßiger, als beim Jüngeren Steinsalz. Dasselbe gilt von den Entlastungskurven. Der Übergang von der Belastungs- zur Entlastungskurve erfolgt beim ersten

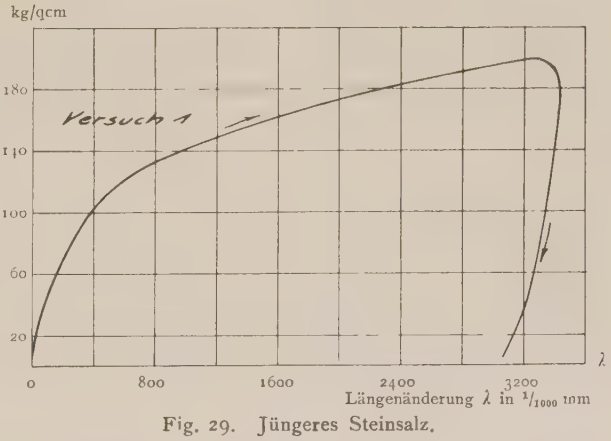

Fig. 29. Jüngeres Steinsalz.

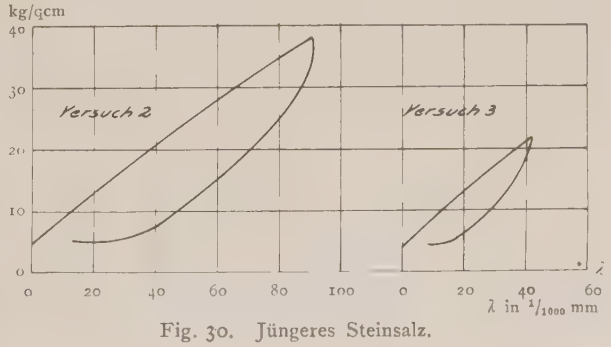

Fig. 30. Jüngeres Steinsalz.

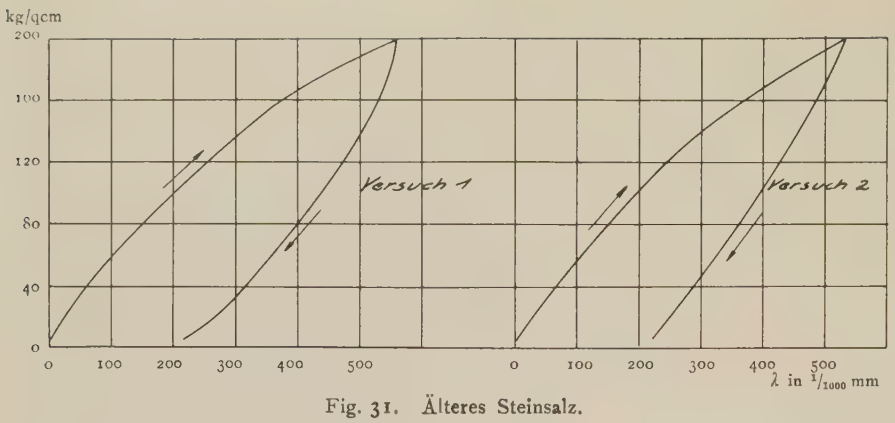

Fig. 31. Älteres Steinsalz.

Versuch allmählich, während beim zweiten Versuch eine deutliche Spitze vorhanden ist. Die bleibende Längenänderung beträgt bei Nullast 240/1000 mm. Bei dem zweiten Versuch macht sich sehr deutlich bemerkbar, welchen Einfluß eine stufenweise Belastung mit jedesmaliger Entlastung zwischen den einzelnen Druckstufen hat.

Ebenso wie beim Jüngeren Steinsalz wurde hier beim Älteren Steinsalz ein weiterer Versuch mit geringerer Belastung vorgenommen (Fig. 32). Bei 40 kg/qcm zeigt die Kurve keine wesentliche Abweichung gegenüber denen, die mit 200 kg/qcm belastet wurden. Das Bestreben, seine alte Form wieder einzunehmen, ist in beiden Fällen etwa gleich groß. Auffallend ist ein Vergleich der Kurven des Jüngeren und Älteren Steinsalzes, die mit 40 kg/qcm belastet sind. Die beiden bei 200/qcm aufgestellten Kurven weichen sehr stark voneinander ab, da beim Jüngeren Steinsalz die Elastizitätsgrenze offensichtlich überschritten war. Hier dagegen, bei einer Belastung von nur 40 kg/qcm, haben beide Kurven starke Ähnlichkeit, so daß man annehmen kann, daß die Elastizitätseigenschaften der beiden Salze innerhalb der Elastizitätsgrenze annähernd übereinstimmen.

Hartsalz.

Von den drei untersuchten Salzsorten hat das Hartsalz die größte Elastizität. Beim ersten Versuch wurde die Belastung auch wieder bis 200 kg/qcm gesteigert. Der Verlauf von Be- und Entlastungskurve (Fig. 33) hat starke Ähnlichkeit mit dem des Älteren Steinsalzes. Beim zweiten Versuch haben beide Kurvenäste wieder den gleichmäßigen Verlauf, der auch hier wieder durch stufenweise Be- und Entlastung erreicht wurde.

Einen Beitrag zur Plastizitätsfrage der Salze liefern diese Versuche auch. Wenn bei den angewandten geringen Drücken sich eine verhältnismäßig hohe bleibende Längenänderung ergibt, so kann man daraus sehen, daß das Fließvermögen der Salze ziemlich hoch ist, am höchsten beim Jüngeren Steinsalz.

Zusammenstellung der Ergebnisse bei den Elastizitätsversuchen.

Auf Fig. 34 sind die gesamten Längenänderungen der einzelnen Körper bei den verschiedenen spez. Drukken aufgetragen. Der Anhydrit hat die geringste Längenänderung. Ganz in seiner Nähe liegt die Kurve für Zechsteinkalk. Nach einem größeren Abstand folgt dann der Kupferschiefer, der besonders für sich steht. Zu einer Gruppe gehören dann wieder Hartsalz und Älteres Steinsalz. Eine ganz andere Stellung nimmt das Jüngere Steinsalz ein. Hier ist die Längenänderung ganz außerordentlich hoch. Bei einer Belastung von 200 kg/qcm ist die Längenänderung beim Jüngeren Steinsalz 31 mal so groß wie die vom Anhydrit, 26 mal so groß wie die vom Zechsteinkalk, 17 mal so groß wie die vom Kupferschiefer, 8 mal so groß wie die vom Hartsalz und 6 mal so groß wie die vom Älteren Steinsalz.

Auf der Tabelle 3 sind die E.-Moduln für die einzelnen spezifischen Drucke zusammengestellt. Diese Werte wurden durch Umrechnung aus der jeweiligen Belastung bei einer Stufe und der dazu gehörigen Längenänderung gefunden. Man sieht hieraus, daß Anhydrit den höchsten E.-Modul hat, der aber nicht viel über dem vom Zechsteinkalk liegt. Bei den Zahlen für das Jüngere Steinsalz ist zu berücksichtigen, daß nur der erste Wert unterhalb der Elastizitätsgrenze liegt, wie aus der Kurve auf Fig. 29 hervorgeht. Bei den höheren Druckstufen wird der E.-Modul bei den einzelnen Gesteinsarten ziemlich beständig. Man sieht auch aus der Tabelle, daß bei allen untersuchten Gesteinsarten mit steigendem Druck eine fallende Tendenz des E.-Moduls vorhanden ist.

In der letzten Spalte sind die entsprechenden Druckfestigkeiten angegeben. Für Zechsteinkalk und Kupferschiefer wurde das Mittel genommen.

Es ist in der Literatur vielfach üblich, den E.-Modul außer in kg/qcm noch in C. G. S. Einheiten

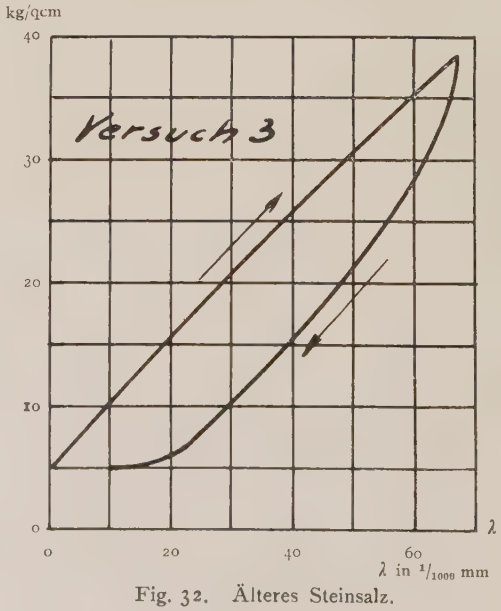

Fig. 32. Älteres Steinsalz.

Tabelle 3. Tabelle der E-Moduln bei den einzelnen spezifischen Drucken.

kg/qcm	50	100	150	200	300	400	500	600	700	Druck-festigkeit in kg/qcm
Hartsalz . . .	77 500	72 000	59 000	47 000	—	—	—	—	—	315
Jüng. Steinsalz	39 000	22 500	9 000	5 000	—	—	—	—	—	320
Ält. Steinsalz .	56 500	49 500	42 500	32 500	—	—	—	—	—	435
Kupferschiefer	—	125 000	—	104 000	97 000	92 000	87 000	83 000	80 000	950
Zechsteinkalk .	—	198 000	—	166 000	152 000	143 000	138 000	133 000	—	1800
Anhydrit . . .	—	200 000	—	180 000	170 000	164 000	161 000	160 500	160 000	1200

anzugeben. Infolgedessen sind in Fig. 35 Kurven von E.-Moduln aufgestellt, bei denen auf der Abszissenachse die C. G. S. Einheiten und auf der Ordinatenachse die Belastung in kg/qcm aufgetragen ist. An erster Stelle steht das Jüngere Steinsalz mit dem äußerst niedrigen Wert von $0{,}39 \cdot 10^{11}$ bis $0.05 \cdot 10^{11}$ C. G. S. Dies besagt, daß bei dem niedrigst angewandten Druck der E.-Modul 39000 kg/qcm und beim höchsten angewandten Druck 5000 kg/qcm beträgt. Dabei muß man auch wieder beachten, daß die Elastizitätsgrenze etwa bei 90 kg/qcm überschritten wurde. Den höchsten Wert hat der Anhydrit mit $2{,}0 \cdot 10^{11}$ C. G. S. Es muß hier erwähnt werden, daß Reich (2) den E.-Modul von Steinsalz mit $3{,}5 \cdot 10^{11}$ angibt, während nach meinen Versuchen Älteres Steinsalz nur den Wert $0{,}4 \cdot 10^{11}$ C. G. S. hat. Reich hat seinen Wert aus der Fortpflanzungsgeschwindigkeit der longitudinalen Wellen errechnet. Dieser Wert bezieht sich also auf das Salz, das in der Tiefe unter allseitigem Druck steht. Dadurch muß, wie meine entsprechenden Versuche gezeigt haben, die Festigkeit bedeutend wachsen. Wir haben es also beim Salz danach mit einem Material zu tun, dessen Elastizität unter allseitigem Druck sehr hoch ist, dessen Elastizitätsgrenze jedoch sehr bald überschritten wird, sobald eine Gleichgewichtsstörung eintritt. In der vorliegenden Arbeit wurden die Elastizitätsversuche bei einem Seitendruck auf die Körper von 1 Atm. ausgeführt, es erfolgte also nur einseitiger Druck.

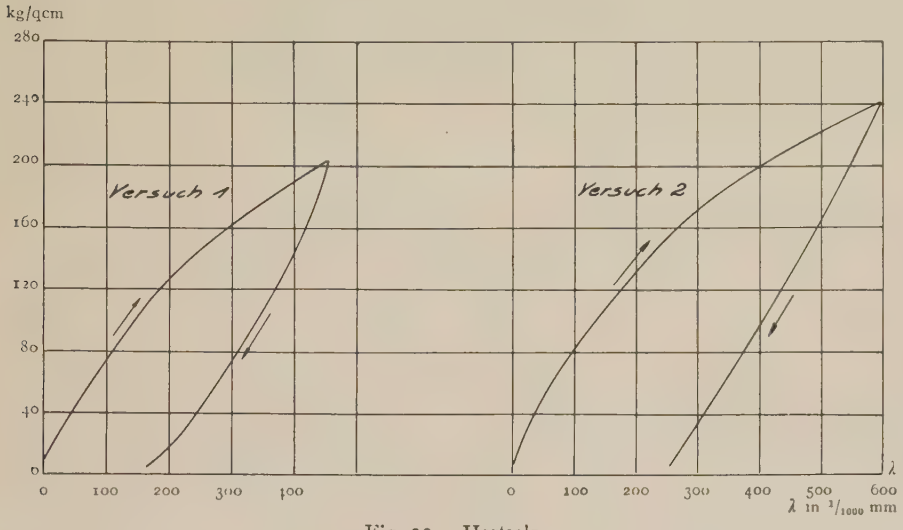

Fig. 33. Hartsalz.

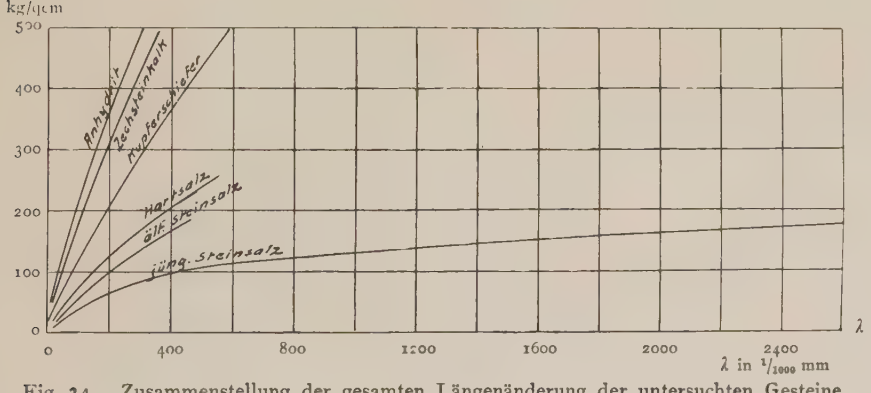

Fig. 34. Zusammenstellung der gesamten Längenänderung der untersuchten Gesteine.

Nutzanwendung der angestellten Versuche.

Es erscheint als zweckmäßig, die Nutzanwendungen getrennt für den Mansfelder Kupferschieferbergbau und den Kalibergbau zu behandeln.

Mansfeld.

Für die Gebirgsdruckfragen in Mansfeld hat Gillitzer (13 u. 14) wissenschaftliche Untersuchungen angestellt.

Das Wesentliche für die Erleichterung des Abbaus in Mansfeld ist danach der Kämpferdruck, der sich ständig ändert, ganz der Größe der jeweiligen Abbaufläche entsprechend. Hat die Abbaufläche einen kleinen Durchmesser, etwa bis zu 70 m, so sind die Auswirkungen des Gebirgsdruckes noch verhältnismäßig gering, erleichtern aber doch schon die Gewinnung des Flözes, die in diagonalem Strebbau vor sich

geht. Fäule und Zechsteinkalk biegen sich über dem Versatz durch und bewirken auf diese Weise eine Druck- und Zugspannung auf den Abbaustoß. Um diese Durchbiegung in den nötigen Grenzen zu halten, muß ein möglichst dichter, unnachgiebiger Versatz eingebracht werden.

Wird dann der Abbau größer, so beginnt der Anhydrit, der bis zu 70 m mächtig ist, hereinzubrechen.

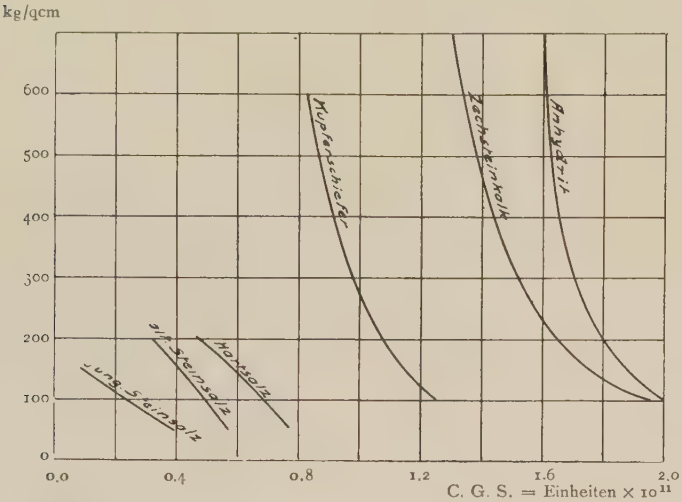

Fig. 35. Zusammenstellung der E-Werte der untersuchten Gesteine.

Erst jetzt beginnt die eigentliche Wirkung des Gebirgsdruckes. Gillitzer hat an verschiedenen Aufschlüssen festgestellt, daß sich über dem Abbau ein Gewölbe bildet. Je weiter sich der Abbau ausdehnt, um so höher und größer wird das Gewölbe.

An den Stützpunkten des Gewölbes auf der Verhaulinie entsteht der sogenannte Kämpferdruck. Wie die nebenstehende Fig. 36 zeigt, wirkt dieser Kämpferdruck keilförmig in das unverritzte Flöz hinein. Ob dieser Kämpferkeil steil oder flach gegen das Flöz zu einfällt, richtet sich nach der Größe des Gewölbes. Durch die Richtung des Kämpferkeiles wird auch eine Einteilung in die einzelnen sogenannten Druckprofile möglich, da ja entsprechend der Richtung des Kämpferdruckes der Strebstoß eine mehr oder weniger senkrechte Stellung annimmt. Fig. 34 zeigt den Verlauf der Druckkräfte des Gewölbes.

Mit der ständigen Vergrößerung des Gewölbes werden immer neue Anhydritschalen spannungslos und platzen ab. In welcher Form sich dabei das Gewölbe verändert, zeigt Fig. 38. In unmittelbarem Zusammenhang mit der Gewölbebildung steht die Schlechtenbildung. Nach seiner neueren Arbeit ist Gillitzer der Auffassung, „daß auch die Druckschlechten nichts anderes sind, als Ablösungs- oder Abplatzungsflächen von inneren Gewölbeschalen, die ihre Standfestigkeit verloren haben."

Durch Vorwärtsschreiten der Gewölbestützpunkte wird auch der Kämpferkeil immer von neuem in das unverritzte Gebirge verlegt. Durch die Wirkung des Keiles werden die Abscherungsflächen im Gebirge vorgebildet. Sobald nun wieder eine innere Gewölbeschale spannungslos wird, wird sie entlang der vorgebildeten Abscherungs- oder Druckschlechtenfläche hereinplatzen. Auf diese Weise läßt sich das Flöz zum Teil in großen Stücken leicht hereingewinnen.

Im folgenden soll untersucht werden, in welchem Maße sich die Versuchsergebnisse der vorliegenden Arbeit mit den Mansfelder Gebirgsdruckfragen in Einklang bringen lassen.

Zunächst lassen sich aus den Elastizitäts- und Kompressionsversuchen verschiedene Folgerungen ziehen. Diese beiden Eigenschaften sind außerordentlich wichtig, da sich aus ihnen ein Arbeitsvermögen der Gesteine ergibt. Langecker schuf den Begriff des „latenten Arbeitsvermögens". Es wird unter diesem Ausdruck die Fähigkeit eines komprimierten Gesteines, sich nach Entlastung ausdehnen zu können, verstanden. Das Gestein muß also mehr oder weniger komprimierbar sein und muß auch eine entsprechende Elastizität haben, durch welche überhaupt erst ein Ausdehnungsbestreben bedingt ist.

Aus den angestellten Versuchen geht hervor, daß Kupferschiefer die höchste Kompression, aber die geringste Elastizität hat. Umgekehrt sind die Verhältnisse beim Anhydrit. Er hat die geringste Kompression und die höchste Elastizität. Es ergeben sich daraus verschiedene Folgerungen.

Durch die verhältnismäßig hohe Elastizität des Anhydrits werden die Ansichten über den Anhydritdruck und die sogenannten Hauptdrücke unterstützt und noch betont. Wenn der Anhydrit als unelastisch angenommen würde, so würde beim Durchbrechen der Anhydritschalen der Schlag auf den Zechsteinkalk lediglich durch Fallhöhe und Gewicht der Schalen bestimmt sein. Kommt nun aber auch als dritter Faktor hohe Elastizität des Anhydrits hinzu, so ist die Folge, daß der Schlag bedeutend heftiger sein wird. Das latente Arbeitsvermögen des Anhydrits, das sich neben der reinen Fallwirkung einerseits im Zubruchegehen mancher Strebabschnitte, andererseits in einer zeitweiligen besseren Gewinnungsmöglichkeit des betreffenden Flözteiles äußert, ist entschieden

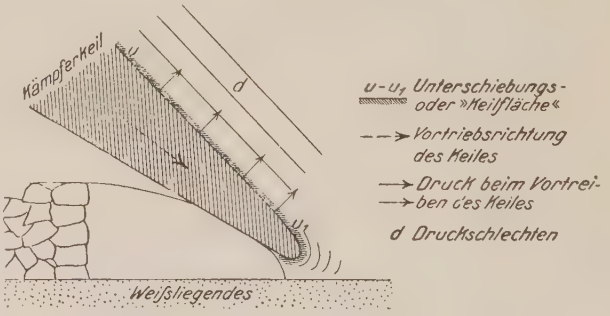

Fig. 36. Aus der Arbeit von Gillitzer.

als groß anzusehen. Da gerade bei diesen Hauptdrücken eine große Gefahr für das Zubruchegehen ganzer Strebteile besteht, ist ein möglichst sorgfältiger Versatz nötig.

Bei dieser Gelegenheit kann man an die Auffassungen Lindemanns (22) über die Entstehung der

Gebirgsschläge erinnern. Müllers Versuche (20) über Karbongesteine haben diese Auffassung bestätigt. Es wird dort gesagt, daß in dem hangenden Sandstein große Biegungskräfte aufgespeichert sind. Beim Reißen des Sandsteins und bei seiner Rückkehr in die gestreckte Lage wird eine Schlagwirkung auf das vergleichen. Solange die Gesteinsschalen beim Versuch noch unter dem Preßstempel stehen, solange sie also noch unter Spannung stehen, sitzen sie vollkommen fest und lassen sich nicht mit der Hand ablösen. Sobald jedoch die vorderste Schale aus der Stahlform herausgewandert ist, wird sie spannungs-

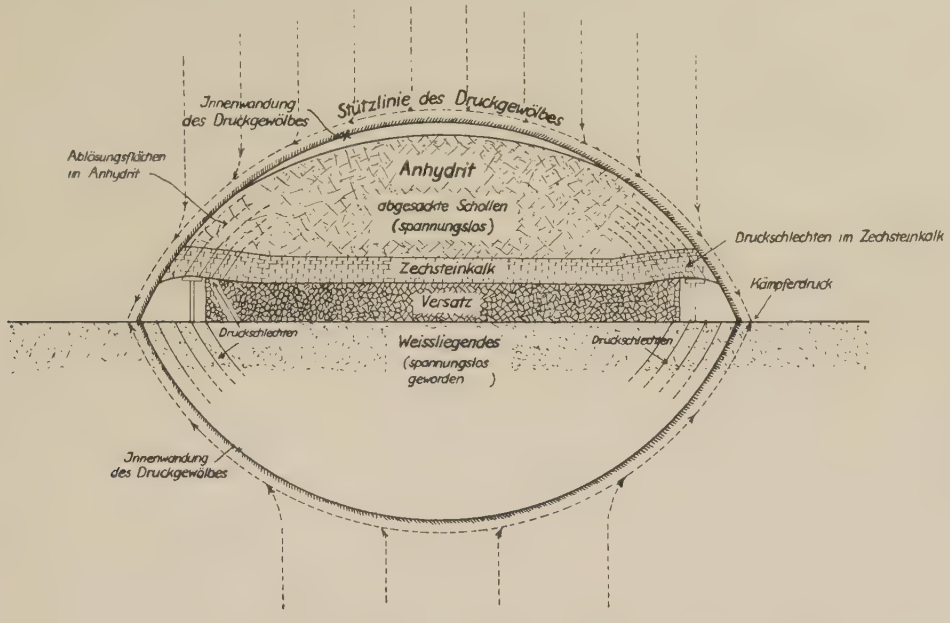

Fig. 37. Das Druckgewölbe beim Abbau mit dem spannungslos gewordenen Gebirgskern (nach Gillitzer).

Flöz und das Liegende ausgeübt werden. Da ja nach meinen Versuchen der Anhydrit auch einen ziemlich hohen E-Modul hat, dürfte ein Vergleich mit derartigen Gebirgsschlägen unter dem Sandstein und den „Hauptdrücken" in Mansfeld durchaus be-

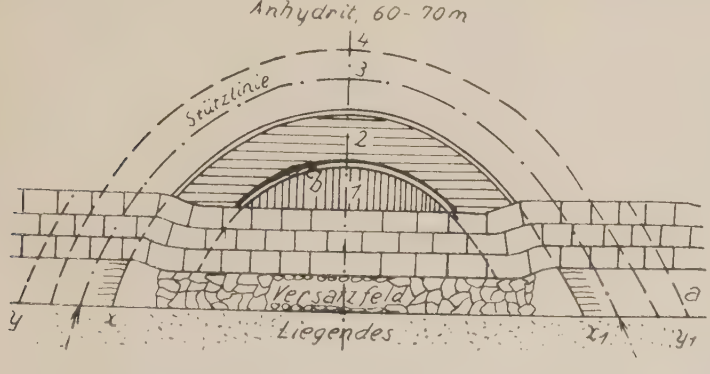

Fig. 38. Querschnitt durch einen Mansfelder Flözabbau. *a* Flöz, *b* Ablösungskluft, $x—x_1$ erster, $y—y_1$ zweiter Stand des Abbaus (nach Gillitzer).

rechtigt sein, da ja das Auftreten dieser Hauptdrücke sich auch schlagartig auf das Flöz äußert.

Für die Entstehung der Drucklagen und Druckschlechten können die Versuche über die Rißbildung herangezogen werden. Die Drucklagen, die Gesteinsbänke zwischen je zwei Schlechten, verlaufen vollkommen parallel der bogenförmigen Verhaulinie. Der Verlauf der Rißbildungsversuche läßt sich sehr gut mit dem Vorgang beim Abplatzen der Gewölbeschalen los. Sie läßt sich dann ganz leicht ablösen oder fällt selbst herunter. Das Ablösen der Schalen und die Rißbildung über den ganzen Würfel hin verläuft immer parallel zur offenen Würfelkante, also ganz analog den Drucklagen im Flöz, Hangenden und Liegenden.

In Fig. 12 wurde eine Skizze gezeigt, an der man die Gestalt des Druckkeiles sehen kann, der sich im Würfel bildet. In Gillitzers Arbeit (14) befindet sich auf S. 9 die Fig. 11, die einen interessanten Vergleich mit diesem Druckkeil gestattet (Fig. 39). Verfolgt man den Verlauf der Druckschlechten, so kann man sehen, daß sich hier im Hangenden auch eine Art Keil bildet. Umstehend ist die Figur aus Gillitzers Arbeit mit dem eingezeichneten Keil wiedergegeben. Dieser Vergleich ist besonders wertvoll, da es sich bei Gillitzers Figur um einen naturgetreuen Aufschluß aus der Grube handelt.

Aus den Versuchen über die Plastizität läßt sich so viel folgern, daß eine ausgesprochen plastische Umformung der Mansfelder Gesteine wohl nicht in Frage kommt. Der Begriff der latenten Plastizität, der von Heim geschaffen wurde, kann hier, wo es sich ja nur um bergmännische Teufen handelt, nicht verwendet werden. Die Untersuchungen ergaben immer eine deutliche Zertrümmerung der Gesteine. Bei verschiedenen Versuchen trat dann hinterher eine mehr oder weniger starke Verfestigung ein.

Kalibergbau.

Für den Salzbergbau ist eine gesonderte Behandlung der Gebirgsdruckfragen berechtigt, da sich hier der Gebirgsdruck in verschiedenen Formen äußert, die sonst im Bergbau nicht anzutreffen sind. Im Kapitel „Vorrichtung und Abbau" der Kalibergbaukunde von Spackeler befinden sich nähere Ausführungen über die Gründe, die diese besonderen Gebirgsdruckauswirkungen im Kali- und Steinsalzbergbau erläutern. Danach sind es die ganz besonderen Eigenschaften der verschiedenen Salzgesteine, die für den speziellen Gebirgsdruck im Salz verantwortlich zu machen sind.

Zunächst möge die Frage untersucht werden, inwieweit sich aus den angestellten Versuchen über die Druckfestigkeit der Salzgesteine irgendwelche

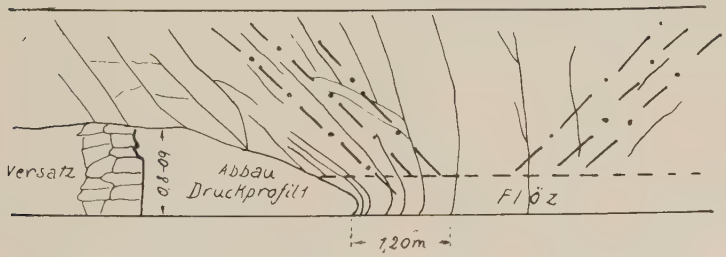

Fig. 39. Naturgetreue Aufnahme eines auf Flügel 8, Wolfschacht, quer durch den Abbaustoß geschaffenen Aufschlusses. Der Übersichtlichkeit halber sind nur einige Schlechten hier aufgetragen. Die strichpunktierten Linien stellen den Druckkeil dar (nach Gillitzer).

Folgerungen für den Salzbergbau ergeben. Die Druckfestigkeit der Salzgesteine wurde verschiedentlich als Grundlage für die Berechnung der einzelnen Pfeilerstärken im Firstenbau angewendet. Im allgemeinen richtet sich die Bemessung der Pfeiler nach den Erfahrungen, die auf den einzelnen Werken mit Rücksicht auf die Gebirgsbeschaffenheit gesammelt sind. Der erste Versuch, die Ausmaße der Pfeiler rechnungsmäßig zu bestimmen, stammt wohl von Kegel (25). Er stellte eine Formel auf, in welcher unter anderem die Druckfestigkeit der Salze als ein Faktor enthalten ist. Da aber die Druckfestigkeit noch nicht experimentell bestimmt war, nahm Kegel einen Wert von 150 bis höchstens 200 kg/qcm für Steinsalz an. Daß dieser Wert weit unter dem wirklichen Wert lag, wurde später mehrfach experimentell festgestellt. Kegel kam ja auch zu dem Schluß, daß in einer Teufe von etwa 700 m der übliche Kammerbau theoretisch nicht mehr möglich ist. Daß diese Art Abbau tatsächlich in weit größeren Teufen möglich ist, hat seitdem die Praxis zur Genüge bewiesen. Rodatz (18) stellte 1914 zum ersten Male versuchsmäßig die Druckfestigkeit der Salze fest. Auf Grund seiner sorgfältigen Untersuchungen nahm er eine Ergänzung der von Kegel gefundenen Werte vor. Er errechnete mit Hilfe der Kegelschen Formel, daß ein Kammerbau im Carnallit bis zu 1240 m Teufe, im Hartsalz bis zu 1800 m Teufe möglich sei. Börger (24) rechnete mit einer Druckfestigkeit von 450 kg/qcm. Dieser Wert wird meistens bei derartigen Berechnungen verwendet und stimmt auch mit den Untersuchungen von Rodatz und mir überein.

Auf Grund meiner Untersuchungen mit der Kármánpresse bei allseitigem Druck auf den Körper kommt nun noch ein neuer Faktor bei der Berechnug der Pfeilerstärke hinzu, der hisher noch nicht berücksichtigt wurde. Bei den normalen Druckversuchen an einem Würfel oder einem Zylinder wirkt auf die Seitenflächen ein Druck von nur 1 Atm. Meine Versuche mit der Kármánpresse zeigen, in welchem Maße die Druckfestigkeit wächst, wenn ein Mantel- oder Seitendruck auf den Versuchskörper ausgeübt wird. Hieraus müssen wir die Folgerung ziehen, daß man zur Berechnung der Pfeiler nicht einfach die normale Druckfestigkeit als Grundlage nehmen kann. Ein Vergleich zwischen dem Versuch unter der Presse und den Pfeilern käme höchstens für die Randteile der Pfeiler in Frage. Der innere Teil des Pfeilers dagegen liegt in einer allseitigen Einspannung; die Widerstandskraft wächst also in den inneren Teilen. Der Manteldruck, der von dem Versatz auf den Pfeilerkern ausgeübt wird, soll hier nicht berücksichtigt werden. Es läßt sich allerdings nicht sagen, wie groß der Seitendruck ist, der auf die Kernteile des Pfeilers wirkt. Aber an Hand meiner Versuche läßt sich doch immerhin soviel sagen, daß die Festigkeit im Inneren des Pfeilers erheblich zunimmt. Bei dem ausgeübten Seitendruck von 500 kg/qcm erreichte ich eine Steigerung der Druckfestigkeit um das $2\frac{1}{2}$- bis $3\frac{1}{2}$fache. Auf diese Weise lassen sich manche Fälle erklären, in denen die Pfeiler eine größere Festigkeit bewiesen haben, als man ihnen zutraute. In diesem Zusammenhang müssen die beiden bekannten Unfälle erwähnt werden, die in der Kalibergbaukunde und dem Vortrag von Spackeler (16) näher geschildert werden. Die Unfälle ereigneten sich auf Ludwig II im Jahre 1901 und auf den Halleschen Kaliwerken im Jahre 1917. In beiden Fällen waren die Pfeiler erfahrungsgemäß so bemessen worden, daß sie normalerweise die auf ihnen lastenden Gebirgsmassen tragen konnten. Es erfolgte ein Zubruchegehen ganzer Grubenabschnitte. In beiden Fällen waren die Pfeiler imstande, die in Bewegung befindlichen Hangendmassen aufzufangen. man sieht daraus, daß ihre Festigkeit außerordentlich groß gewesen sein muß. Würde man die Festigkeit der Pfeiler als durchgehend gleich annehmen, so wären sie vielleicht unter der Wirkung der kinetischen Kraft zu Bruch gegangen. Börger spricht ähnliche Gedanken aus, indem er sagt, daß die Festigkeit der Pfeiler stärker zunimmt, als es dem wachsenden Querschnitt entsprechen würde. Meine Versuche belegen dies zahlenmäßig. Mit wachsendem Pfeilerquerschnitt muß natürlich der Seitendruck auf den Pfeilerkern stärker werden, und damit wächst bedeutend die Gesamtfestigkeit des Pfeilers.

Zusammenfassend kann man sagen, daß alle theoretisch errechneten Pfeilerstärken, die die normale Druckfestigkeit der entsprechenden Salze als Grundlage wählen, nur Mindestmaße darstellen können.

Man muß dabei die eben geschilderte Erhöhung der Festigkeit im Innern des Pfeilers berücksichtigen.

Weitere Folgerungen für die Praxis lassen sich aus den Versuchen über die Plastizität und Elastizität sowie die Kompression der Salzgesteine ziehen. In dem Abschnitt „Die Sicherheit der Grubenbaue“ der Kalibergbaukunde befinden sich einige Ausführungen, die im Zusammenhange mit den vorliegenden Untersuchungen sehr wichtig sind. Es heißt dort auf S. 96: „Nach praktischen Erfahrungen steigt der Druck mit der Mächtigkeit des über dem Kalisalz lagernden Hauptanhydrits, während er mit der Zunahme der Decke von Jüngerem Steinsalz abnimmt. Werke, welche ohne die schützende Decke von Jüngerem Steinsalz arbeiten, haben daher schon bei geringen Teufen mit erheblichem Druck zu rechnen.“

Meine Versuche haben ergeben, daß gerade das Jüngere Steinsalz eine außerordentlich hohe Plastizität hat. Wenn nun diese schützende Decke von Jüngerem Steinsalz über den Abbauen liegt, so besagt dies, daß sich infolge dieser hohen Plastizität und der damit verbundenen hohen Kohäsion Gebirgsdruck wenig bemerkbar macht. Um das mehr oder weniger mächtige Salzlager völlig zu durchdringen und entsprechende Gebirgsdruckserscheinungen hervorzurufen, müssen recht beträchtliche Überlagerungsdrücke nötig sein, die erst in größeren Teufen erreicht werden können. Die anderen Salze haben eine geringere Plastizität, wie meine Elastizitätsversuche ergeben haben. Hier werden sich in darunterliegenden Grubenbauen Gebirgsdruckwirkungen eher bemerkbar machen.

Man darf nun nicht annehmen, daß die hohe Plastizität des Jüngeren Steinsalzes ein starkes Hereinquellen der Firste zur Folge haben müßte. Dazu sind wohl die für die große Fläche erforderlichen Druckkräfte nicht vorhanden. Daß aber eine Absenkung über den Bauen tatsächlich vorhanden ist, wird u. a. von Spackeler geschildert. Durch Nivellements hatte man festgestellt, daß auf verschiedenen Werken eine Absenkung des Jüngeren Steinsalzes in seiner Gesamtheit stattgefunden hatte, die aber mit wenigen Ausnahmen nur gering war.

Die schützende Decke des Jüngeren Steinsalzes verhindert einerseits ein zu schnelles Durchbiegen oder Hereinbrechen der Firste. Andererseits wird durch diese Fläche der Druck, der auf die Pfeiler wirkt, wesentlich verteilt und verringert. Ein schwächerer Pfeiler unter jüngerem Salz wird vielleicht dieselben Dienste verrichten können wie ein stärkerer unter älterem Salz. Man muß also bei theoretischen Berechnungen der Pfeilerstärken im gegebenen Fall diese Tatsache berücksichtigen. Auf Grund der wenigen angestellten Versuche lassen sich natürlich keine positiven Schlüsse ziehen, ob diese angegebene Meinung wirklich richtig ist, aber es muß doch zugegeben werden, daß diese Möglichkeit besteht.

Einmal wird naturgemäß der Gebirgsdruck auch ausreichen, um selbst die Decke des Jüngeren Steinsalzes zu durchdringen. Wann dieser Zeitpunkt gegeben ist, hängt im allgemeinen von der entsprechenden Teufe ab. Dieser Übergang kann z. T. recht deutlich und scharf sein. Spackeler spricht in diesem Zusammenhang von einer „oberen, fast druckfreien“, und einer „unteren, stark druckhaften Teufenzone“. Der Druck, der auf die Pfeiler ausgeübt wird, ist dann wieder recht beträchtlich. Das läßt sich besonders an Strecken im Liegenden beobachten, die unter einem Pfeiler wesentlich mehr unter Druck zu leiden haben als unterhalb einer Abbaukammer.

Gerade entgegengesetzt liegen die Verhältnisse, wenn über den Grubenbauen Anhydrit liegt. Je mehr die Grubenbaue unter dem Einfluß des Anhydrits stehen, um so mehr haben sie unter dem Gebirgsdruck zu leiden. Es handelt sich allerdings hier um den Hauptanhydrit, während von mir nur der untere Anhydrit untersucht wurde. Die Versuche von Rodatz und mir zeigen, daß die geologischen Horizonte in diesem Fall keine Verschiedenheit in der Festigkeit bedingten, da in beiden Fällen die gleiche Druckfestigkeit von 1200 kg/qcm erzielt wurde. Daher kann man wohl annehmen, daß auch die Elastizität, Plastizität und Komprimierbarkeit ähnlich ist. In seinem elastischen Verhalten nähert sich der Anhydrit dem Sandstein, wie meine Versuche ergeben haben. Eine Durchbiegungsbewegung über den Abbaukammern macht er nur bis zu einem gewissen Grade mit, bis er dann plötzlich bricht. Dies plötzliche Brechen erfolgt unregelmäßig und erweckt häufig den Eindruck, als ob irgendwo Schüsse abgetan würden. Für den Mansfelder Bergmann ist das Zerbrechen des Anhydrits eine bekannnte Erscheinung, während sie im Salzbergbau selten beobachtet wird. Über die näheren Einzelheiten beim Zerbrechen des Anhydrits ist in dem Abschnitt über den Mansfelder Bergbau das Nötige gesagt worden.

Dadurch, daß der Anhydrit eine sehr geringe Komprimierbarkeit hat, wie meine Versuche gezeigt haben, wird naturgemäß der auf dem Anhydrit lastende Gebirgsdruck verhältnismäßig leicht auf den Untergrund übertragen. Hier wird nicht die ganze Beanspruchung wie beim Jüngeren Steinsalz für die Umformung im Inneren des Gesteins aufgebraucht, der Anhydrit hat also eine gute Leitfähigkeit für den Gebirgsdruck. Auch beim Anhydrit stimmen meine Versuche vollkommen mit der Tatsache überein, daß er unter den Gesteinen der Salzlagerstätten im Verhalten gegenüber dem Gebirgsdruck einen Grenzfall bildet.

Auf die Frage der Plastizität der Salzgesteine muß noch etwas näher eingegangen werden, da über diesen Punkt mancherlei verschiedene Meinungen vorhanden sind. Im allgemeinen wird die Ansicht vertreten, daß alle Salzgesteine eine mehr oder weniger vollkommene Plastizität haben. Von dieser Ansicht gehen nur wenige Forscher ab. Lachmann (19) z. B. vertritt den Standpunkt, daß das Steinsalz völlig unplastisch sei. Nur so sei es seiner Meinung nach zu erklären, daß im Salz große Grubenräume lange Zeit ohne Ausbau stehen können. Um aber bei der Verneinung der Plastizität die Erscheinungen bei der Salztektonik zu erklären, schuf er die Theorie von der Autoplastie der Salzgesteine. Er verstand darunter eine Formänderung der Salzkörper, die ihre Grundlage in Lösungserscheinungen und Rekristallisations-

vorgängen hat. Diese Theorie ist von verschiedensten Seiten bekämpft worden. Daß die Salzgesteine tatsächlich mehr oder weniger gut plastisch sind, wird wohl kaum noch bestritten. Jedoch sind die Ansichten darüber sehr verschieden, welche Drücke nötig sind, um eine plastische Umformung der Salze zu erreichen. Die experimentellen Untersuchungen, die über diese Frage angestellt worden sind, weichen sehr stark voneinander ab. Das hängt wohl in der Hauptsache von der Verschiedenartigkeit der Versuchsbedingungen ab. Daß Kick (3) und Rinne (7) bereits früher Versuche anstellten, wurde schon erwähnt. Soweit es sich bei meinen Versuchen um die Anwendung der Kickschen Methode handelt, liegen die Werte wohl unter denen von Rinne, doch scheint der Unterschied sich in durchaus möglichen Grenzen zu bewegen. Neuere Untersuchungen von Geller und Joffé (11.) ergaben sehr stark abweichende Werte. Während Geller (8. u. 9.) z. B. für Steinsalz einen Fließdruckwert von 7800 kg/qcm (bei 20 ° C.) findet, beträgt der entsprechende Wert bei Joffé nur 90 kg pro qcm. In diesem Zusammenhang ist beachtenswert, daß meine Kurve vom Jüngeren Steinsalz bei einem Wert von 90 kg/qcm die Fließgrenze überschreitet. Wenn auch die Untersuchungsbedingungen von Joffé anders waren, als die von mir, so scheint hier doch eine starke Übereinstimmung zu bestehen. Rinne hat die Frage näher untersucht, wie dieser außerordentlich hohe Wert bei Geller zu erklären sei, und schiebt die Hauptschuld auf die Versuchseinrichtung. In diesem Zusammenhang muß nochmals betont werden, daß meine Versuche im Gegensatz zu allen bisherigen Versuchen nicht an Einzelkristallen ausgeführt wurden, sondern an den Salzgesteinen, wie sie aus dem Gebirgsverband herausgenommen waren. Eine Ausnahme bildet nur der Einzelkristall von Beendorf, der bei den Kickschen Versuchen von mir verwendet wurde. Zahlenmäßige Werte in meiner Arbeit lassen sich aus den Elastizitätsversuchen entnehmen. Man sieht daraus, daß die Anwendung von verhältnismäßig niedrigen Drücken doch zum Teil eine recht beträchtliche Formänderung hervorgerufen hat. Besonders gut tritt dies beim Jüngeren Steinsalz hervor.

Für die gute Plastizität der verschiedenen Salzgesteine gibt es in den Grubenbauen zahlreiche Beispiele. Es mögen hier einige angeführt werden.

Auf Seite 66 der Kalibergbaukunde befindet sich eine Schilderung aus dem Salzburger Haselgebirge. Hier fand man Bergleute und Geräte aus der Keltenzeit, die vollkommen von den plastischen Salzmassen umhüllt waren. Die Grubenbaue waren völlig zugewachsen. In diesem Falle kommt außer dem Druck der Gebirgsmassen noch der Faktor Zeit hinzu.

Auf Seite 95 folgt eine Schilderung von einem Nordharzwerk. Der Schacht war bis fast 800 m geteuft und das Lager war bis auf fünf Sohlen in je 75 bis 100 m seigerem Abstand angefahren. Die Sohlen um 700 und 800 m herum erlitten dabei einen so starken Druck, daß es große Schwierigkeiten machte, die Strecken offen zu halten. Es dauerte meist 2 bis 3 Monate, dann waren die Strecken von allen Seiten aus zugequollen.

Ein weiteres Beispiel ist in Spackelers Vortrag enthalten. Auf einem Werk in der Staßfurter Gegend hatte man in einer Steinsalzfirst um einen Aufbruch herum ein einfaches Lattengeländer geschlagen. Um diese Latten war das Jüngere Steinsalz regelrecht herumgequollen, so daß es den Eindruck machte, als ob die Bretter aus dem Salz hervorgewachsen seien. In diesem Zusammenhang erwähnt Spackeler, daß er Risse als Abbauwirkungen im Jüngeren Steinsalz nirgends beobachtet hat. Wenn solche Risse fehlen, so ist dies zum großen Teil auf gute Plastizität zurückzuführen.

Busch (27) bringt eine Schilderung über seine Beobachtungen auf dem Salzbergwerk Neu-Staßfurt. Schon beim Abteufen machte sich das plastische Hereinquellen — Busch spricht von einer „Expansivkraft des Salzes“ — unangenehm bemerkbar. Bei einer Teufe von etwa 500 m machten sich die ersten Anzeichen bemerkbar. Die Fahrschacht-Einstriche aus Kantholz von 20 mal 26 cm Stärke bekamen zunächst Druck, bogen sich durch und zerbrachen schließlich. Bei 750 m Teufe wurde der Schacht mit der Lagerstätte durch einen 4 — 5 m breiten Querschlag verbunden. In diesem Querschlag stellte Busch an verschiedenen Meßpunkten in bestimmten Zeitabständen eine deutliche Verringerung des Querschnittes fest. Busch stellte dann noch einige Versuche an, um festzustellen, wie sich das Salz im Gebirgsverbande verhält. Zu diesem Zweck stellte er Bohrlöcher von 50 cm Tiefe und 40 mm Durchmesser her. In diese Bohrlöcher brachte er Bleirohre, die gerade die Löcher ausfüllten. Schon nach einigen Wochen war ein Herausnehmen der Bleirohre nicht mehr möglich, das Salz hatte sie festgeklemmt. Busch stellte fest, daß bei einer Teufe von 250 m ein Hereinquellen des Salzes so gut wie nicht zu bemerken war, erst bei 300 m fanden sich deutliche Anzeichen.

Ähnliche Erscheinungen wie bei diesen Versuchen mit den Bleirohren hat man auf den Gruben Marie Luise und Fernand im Elsaß gefunden. Dort wurden Versuche angestellt, in welchem Maße Schrämarbeit ratsam erscheint. Dabei haben sich Schwierigkeiten ergeben, die auf die Plastizität des Salzes zurückzuführen waren. Die Schichten kamen sehr schnell in die ausgeschrämte Fläche hinein und dabei kam es zu einem Festklemmen des Schrämarmes.

Bei den bisher geschilderten Fällen ist wohl hauptsächlich die entsprechende Teufe für das plastische Verhalten der Salzmassen verantwortlich zu machen. Abbauwirkungen können aber ebenfalls solche Erscheinungen hervorrufen. Das Zuquellen von Strecken als Folge des Abbaudruckes beobachtete Spackeler auf einem Werk, das eine mächtige Kalilinse abgebaut hatte, wobei das Gebirge rings um diese Linse als Widerlager für das große Gewölbe des Hangenden wirkte. Man konnte beobachten, wie alte Strecken, die von der Linse aus seitwärts ins Feld führten, mehr oder weniger stark zuquollen. Zum Teil war dieses Zuquellen so vollständig, daß

die Gleise ringsum in das Salz eingebettet waren. Mit zunehmender Entfernung von der Linse aus erhielten allmählich die Strecken ihren ursprünglichen Querschnitt wieder. Ein plötzlicher Bruch des Salzes trat niemals ein. All die hier angeführten Beispiele beweisen, daß die Untersuchungsergebnisse im Laboratorium, nach denen die Salzgesteine hoch plastisch sind, durchaus mit den Beobachtungen in der Grube in Einklang zu bringen sind.

Man findet zuweilen im Schrifttum (28) Meinungen, nach denen Steinsalz hinsichtlich der Sprödigkeit mit Gesteinen wie z. B. Anhydrit auf eine Stufe gestellt wird. Dabei wird in solchen Fällen dem Salz eine mehr oder weniger hohe Plastizität meist nicht abgesprochen. Dieser scheinbare Widerspruch läßt sich vielleicht so erklären, daß man nur an die Außenflächen des entsprechenden Salzkörpers denkt, wenn man von Sprödigkeit spricht. Wenn sich in Strecken und Firsten vielfach leicht Schalen ablösen, so besagt dies noch nicht, daß dem Salz an sich die Plastizität fehlt. Diese kommt aber meist erst in der allseitigen Einspannung zur Geltung. Wenn man in der vorliegenden Arbeit bei den Druckversuchen den Würfel von Jüngerem Steinsalz betrachtet, so sieht man deutlich, daß die ausgehöhlten Seitenflächen ganz flach verlaufen. Der übrige Körper hat noch seinen vollen Zusammenhalt. Wäre das ganze Material des Körpers spröde, so würde sich an den Seitenflächen ein regelrechtes Dreieck bilden, wie es bei der Untersuchung anderer Gesteinsmaterialien ist. Im übrigen ist es empfehlenswert, derartige Ausdrücke wie „spröde“ usw. mit Vorsicht zu gebrauchen.

In diesem Zusammenhang muß ich kurz auf die Äußerungen Gillitzers in seinem Abschnitt „Steinsalzdruck“ eingehen. Was Gillitzer hier sagt, sind allerdings nur Vermutungen, da Beobachtungen nicht möglich waren. Trotzdem möchte ich auf Grund meiner Versuche meine Ansicht dazu äußern.

Wenn es in Gillitzers Arbeit auf Seite 10 heißt: „Das Steinsalz hat offenbar eine noch größere Spannkraft und kann größere Abbauhohlräume oder Schichtfugen überspannen als der Anhydrit“, so müßte man danach annehmen, daß das Steinsalz unplastisch sei. Die Versuche haben ein anderes Ergebnis gebracht. Es ist sicher anzunehmen, daß sich die Steinsalzdecke bei den geringen Höhen, um die es sich hier handelt, vollständig durchbiegt. Gillitzer fügt allerdings in einer Fußnote hinzu, daß das Steinsalz auch plastisch sein könnte, aber wohl erst bei sehr hohen Drücken. Die vorliegenden Untersuchungen haben ergeben, daß verhältnismäßig niedrige Drücke Steinsalz plastisch umformen können. Bei den Elastizitätsversuchen wurde ja nur ein Höchstdruck von 200 kg/qcm ausgeübt, und doch war die bleibende Längenänderung recht beträchtlich. Dabei wurde der Faktor Zeit noch gar nicht berücksichtigt. Bei entsprechend längerer Zeit der Belastung würde die bleibende Längenänderung noch erheblicher sein.

Für die Erscheinungen bei den Versuchen über die Rißbildung an den Gesteinen findet man in der Grube auch manche analoge Erscheinungen. Die Versuche hatten gezeigt, wie sich einzelne Gesteinsschalen nacheinander aus der Stahlform herausschoben, wobei der Preßstempel in derselben Richtung mitwanderte.

Auf Seite 97 der Kalibergbaukunde ist ein Hinweis auf eine horizontale Schubbewegung enthalten. Diese Bewegung in Abbaukammern ließ sich an eingebrachten Holzdübeln beobachten. Wir haben es also hier mit ähnlichen Erscheinungen zu tun, wie bei den Rißbildungsversuchen. In beiden Fällen erfolgte eine horizontale Verschiebung gewisser Salzteile.

In dem schon mehrfach erwähnten Vortrag von Spackeler finden sich auch einige Beispiele, die ganz an die angestellten Versuche erinnern. Es wurde bereits vorher von einigen Werken gesprochen, auf denen durch Nivellements festgestellt wurde, daß sich die Absenkung des Jüngeren Steinsalzes meist nur auf einige Millimeter beschränkte. In diesen beobachteten Grubenabschnitten stellte man fest, daß eine horizontale Verschiebung der einzelnen Fixpunkte gegeneinander bis zu 10 cm stattgefunden hatte.

Auf dem einen Staßfurter Werk, auf dem das Jüngere Steinsalz um die Bretter eines Holzgeländers herumgewachsen war, war diese Horizontalbewegung auch deutlich zu beobachten. Die Bretter waren völlig gegeneinander verschoben, schief gestellt und zum Teil zerbrochen. Der Stoß der Abbaukammern war in den Hohlraum regelrecht hineingeschoben worden.

In einem Falle beobachtete Spackeler an einem Streckensicherheitspfeiler im Hartsalz, wie durch zentimeterbreite senkrechte Risse und horizontale Verschiebung einzelne quadersteinähnliche Blöcke entstanden waren.

Man sieht aus diesen wenigen Beispielen deutlich, daß solche horizontalen Verschiebungen der Stöße und des Hangenden nach den Abbauräumen hin ganz in ähnlicher Weise vor sich gehen, wie wir es beim Versuch beobachtet haben. Die Laboratoriumsversuche zeigten also, daß horizontale Verschiebungen möglich sind. Am ersten werden davon naturgemäß die Pfeilerstöße betroffen. Es ist eine bekannte Erscheinung, daß eine große Anzahl von Pfeilern allmählich zerklüften, wobei sich dann die Stöße nach den Grubenräumen zu verschieben. Ein entsprechender Versatz wird diese Verschiebungen herabmindern bzw. ganz unterdrücken.

Eine allgemeine Beantwortung der Frage, wie die großen Grubenräume im Salz ohne Ausbau möglich sind, ist auf Grund der angestellten Versuche vielleicht folgendermaßen zu geben:

Vor allen Dingen ist für die Beantwortung dieser Frage die Tatsache wichtig, daß die Elastizitätsgrenze des Salzes sehr bald überschritten wird. Für das Salz in den Firsten, Bergemühlen u. a. Grubenbauen gilt nun nicht mehr die allseitige Einspannung. Es tritt Entspannung ein. Bei dem niedrigen Druck, der zur Überschreitung der Elastizitätsgrenze nötig ist, kann man annehmen, daß hier bei den Salzteilen um die Grubenbaue herum die Elastizitätsgrenze bereits mehr oder weniger überschritten ist. Das

Salz ist also in ein Stadium geraten, in welchem plastische Umformung erfolgt. Da das Ausdehnungsbestreben oberhalb der Elastizitätsgrenze außerordentlich gering ist, läßt sich wohl auf diese Weise erklären, daß ein Ausbau meist unnötig ist.

Für die Richtigkeit dieser Annahme spricht ein Vergleich der Elastizitätskurven der einzelnen Materialsorten. Die von Müller untersuchten Gesteine, Sandstein, Tonschiefer und Steinkohle sowie die von mir untersuchten Zechsteinkalk, Kupferschiefer und Anhydrit zeigen deutlich, daß ihre Elastizitätsgrenze bei den ausgeübten Belastungen noch nicht überschritten war. Alle hatten ein starkes Bestreben, sofort nach der Entlastung in ihre ursprüngliche Form zurückzukehren. Nur die Salze zeigten ein anderes Verhalten. Selbst bei den hierbei zum Teil sehr niedrigen Drucken erfolgte nur ein geringes und langsames

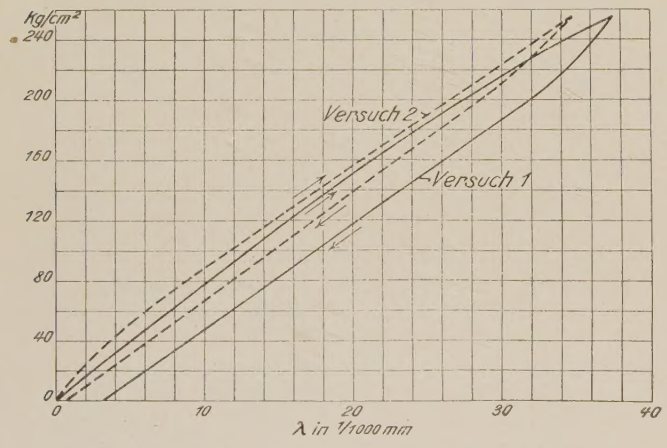

Fig. 40. Spannungs-Dehnungskurve vom Tonschiefer aus der Arbeit von Müller.

Zurückgehen in die alte Form. Um diese Unterschiede hervorzuheben, seien hier einige kennzeichnende Kurven aus Müllers Arbeit von Tonschiefer (Fig. 40) und Kohle (Fig. 41) wiedergegeben. Da der Verlauf dieser Kurven für die oben gestellte Frage so wichtig ist, möge zur Hervorhebung des starken Gegensatzes nochmals auf die Kurven vom Anhydrit (Fig. 28) und älteren Steinsalz (Fig. 31) zurückverwiesen werden.

Die Belastungen bei den Versuchen wurden so gewählt, daß sie im allgemeinen den Bedingungen in der Grube entsprachen. Es ergibt sich also beim Vergleich der Kurven, daß nur bei den Salzgesteinen in den bergmännischen Teufen die Elastizitätsgrenze bereits überschritten ist, während das für alle von Müller und mir sonst untersuchten Gesteine nicht zutrifft.

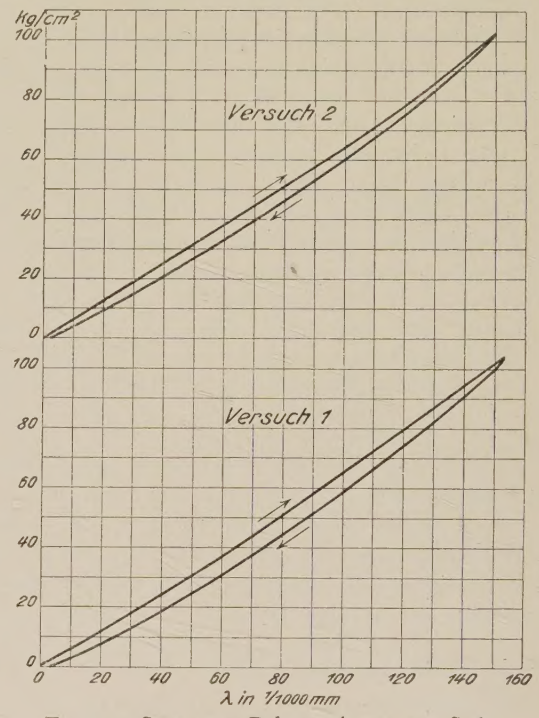

Fig. 41. Spannungs-Dehnungskurve von Steinkohle aus der Arbeit von Müller.

Zusammenfassung.

Im bergmännischen Laboratorium der T. H. Breslau wurden experimentelle Untersuchungen über einige Eigenschaften von verschiedenen Gesteinen der Zechsteinformation ausgeführt. Sodann wurde der Versuch gemacht, einige Nutzanwendungen aus den Versuchen mit den bergbaulichen Verhältnissen im Mansfelder Kupferschieferbergbau sowie im Steinsalz- und Kalibergbau in Einklang zu bringen.

Literaturübersicht.

1. Prandtl und Rinne, Referat über durchgeführte vergleichende Untersuchungen über die Methoden zur Bestimmung der Druckfestigkeit von Gesteinen. Neues Jahrbuch für Mineralogie, 1907, I, S. 45.
2. H. Reich, Die elastischen Eigenschaften der Gesteine. Gerlands Beiträge für Geophysik, 1927.
3. Kick, Die Prinzipien der mechanischen Technologie und die Festigkeitslehre. V. d. I., 1892, S. 919.
4. F. Rinne, Umformung von Kalkspatkristallen und von Marmor unter allseitigem Druck. Neues Jahrbuch für Mineralogie, 1903, I, S. 160.
5. v. Kármán, Festigkeitsversuche unter allseitigem Druck. V.d.I., Forschungsheft Nr. 112, 1911.
6. Martens, Materialienkunde für den Maschinenbau.
7. F. Rinne, Plastische Umformung von Steinsalz und Sylvin unter allseitigem Druck. Jahrbuch für Mineralogie, 1904, S. 114.
8. A. Geller, Zur Kenntnis des Fließdruckes fester Körper. Ztschr. f. Kristallographie, Bd. 62, H. 5 und 6.
9. A. Geller, Über das Verhalten verschiedener Minerale der Salzlager bei hohen Drucken und wechselnden Temperaturen. Ztschr. f. Kristallographie, Bd. 60, H. 5 und 6.
10. Rinne, Bemerkungen zu den experimentellen Erfahrungen von Geller über das Fließen natürlicher Salze und zu den von ihm und O. Mügge aus den gewonnenen Daten gezogenen Schlußfolgerungen. Ber. d. math.-phys. Klasse, Nr. 12, I, S. 12.
11. Joffé, Kirpitschewa und Lewitzki, Deformation und Festigkeit der Kristalle. Ztschr. f. Phys, 1924, S. 286.
12. Heim, Mechanismus der Gebirgsbildung, 1878.
13. Gillitzer, Das Wesen des Gebirgsdruckes und dessen Ausnutzung beim Abbaubetriebe des Mansfelder Bergbaus. Glückauf, 1928, S. 977.
14. Gillitzer, Der Gebirgsdruck beim Mansfelder Bergbau. Intern. Bergwirtsch. u. Bergtechnik, 1930, H. 17.
15. Spackeler, Kalibergbaukunde.
16. Spackeler, Die Wirkung von Versatz und Sicherheitspfeiler. Sonderheft der Kalitagung vom Juni 1923.
17. Spackeler, Vergleichende Betrachtungen über Abbau. Kali, 1927, H. 18 und 19.
18. Rodatz, Die Frage des Spülversatzes für Kalibergwerke. Kali, 1914, S. 92.
19. Lachmann, Der Salzauftrieb. Kali, 1910, H. 8ff.
20. Müller, Versuche an Karbongesteinen zur Klärung von Gebirgsdruckfragen. Glückauf, 1930, S. 1601.
21. Langecker, Die Nutzbarmachung des Gebirgsdruckes für die Kohlengewinnung. Glückauf, 1928, S. 1409.
22. Lindemann, Gebirgsschläge im rheinisch-westfälischen Steinkohlenbergbau. Glückauf, 1926, S. 183.
23. Kiesel und Colin, Die Gewinnung in den Kaligruben des Elsaß. Bull. de la Soc. Ind. de Mulhouse, 1926, Tom. 17.
24. Börger, Die Beziehungen zwischen Gebirgsdruck und Abbausicherheit unter besonderer Berücksichtigung der Verhältnisse beim versatzlosen Steinsalzfirstenbau. Kali, 1929, S. 279.
25. Kegel, Über den Abbau von Kalisalzlagerstätten in größeren Teufen. Glückauf, 1906, S. 1309.
26. Fr. Wöhlbier, Von der ersten hydraulischen Dampfpresse. Mansfelder Heimatkunde, 1926, Heft 2.
27. Busch, Über die Expansivkraft des Steinsalzes. Ztschr. für praktische Geologie, 1907, S. 369.
28. Gärtner, Die Entspannung des Gebirges und der Gase durch den Bergbau. Glückauf, 1931, S. 181.

Lebenslauf.

Am 21. August 1902 wurde ich als Sohn des Volksschulrektors Fritz Wöhlbier in Bergzow (Krs. Jerichow II) geboren. In Eisleben besuchte ich die Mittelschule und das Luther-Gymnasium, wo ich Ostern 1923 mein Abitur ablegte. Nach meinem Studium in München, Clausthal und Breslau legte ich hier in Breslau in der Fachrichtung Bergbau im Jahre 1929 mein Diplom-Hauptexamen ab. Seit dieser Zeit bin ich als Doktorand im bergmännischen Laboratorium der Technischen Hochschule von Herrn Prof. Dr.-Ing. Spackeler tätig.